

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО**  
**ГОСПОДАРСТВА**

**В. П. Андрійченко, С. О. Закурдай**

**«Електричне обладнання  
транспортних засобів»**

**Конспект лекцій**

для студентів 3-4 курсів усіх форм навчання  
напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка»  
та слухачів другої вищої освіти спеціальності  
«Електричні системи і комплекси  
транспортних засобів»

**ХАРКІВ**

**ХНАМГ**

**2010**

**Андрійченко В. П.** «Електричне обладнання транспортних засобів»: Конспект лекцій для студентів 3-4 курсів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» та слухачів другої вищої освіти спеціальності «Електричні системи і комплекси транспортних засобів» / В. П. Андрійченко, С. О. Закурдай; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2010. – 136 с.

Автори:       В. П. Андрійченко,  
                  С. О. Закурдай

Рецензенти: завідувач кафедри електричного транспорту  
                  ХНАМГ професор, д.т.н. В. Х. Далека;  
                  доцент кафедри електричного транспорту  
                  ХНАМГ, к.т.н. Ю. С. Калініченко

Рекомендовано кафедрою електричного транспорту,  
протокол № 1 від 29.08.2009 р.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>4</b>
<b>1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА І КЛАСИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ.....</b>	<b>4</b>
1.1 Класифікація електричного транспорту.....	4
1.2 Класифікація автомобільного транспорту.....	7
<b>2. ВИМОГИ ДО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ</b>	
<b>ТРАНСПОРТУ І ЙОГО КЛАСИФІКАЦІЯ.....</b>	<b>9</b>
<b>3.СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТЧАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ .....</b>	<b>12</b>
3.1 Загальні відомості.....	12
3.2 Допоміжні генератори.....	13
3.3 Характеристики генераторів змінного струму.....	15
3.4 Регулятори напруги.....	17
3.5 Акумуляторні батареї.....	28
<b>4. ОСОБЛИВОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ</b>	
<b>ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....</b>	<b>33</b>
4.1 Електромеханічні характеристики двигунів послідовного збудження.....	33
4.2 Електромеханічні характеристики двигунів паралельного збудження.....	36
4.3 Електромеханічні характеристики двигунів змішаного збудження.....	38
<b>5.ЕЛЕКТРИЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ.....</b>	<b>41</b>
5.1. Електричне гальмування ЕРС постійного струму з контакторно- реостатним керуванням .....	41
5.2 Реостатне гальмування.....	42
5.3 Рекуперативне гальмування.....	69
5.4. Електричне гальмування ЕРС постійного струму з імпульсним керуванням.....	74
<b>6. МЕХАНІЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ.....</b>	<b>83</b>
6.1 Загальні положення.....	83
6.2 Колісно-колодкове гальмо.....	84
6.3 Барабанне гальмо.....	85
6.4 Коефіцієнт тертя.....	86
6.5 Розрахунок гальмівної сили поїзда.....	88
6.6 Обмеження сили натискання колодок по зчепленню.....	88
6.7 Дискові гальма.....	90
6.8 Електромагнітні рейкові гальма.....	92
6.9 Рух поїзда при механічному гальмуванні.....	94
<b>7. ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ</b>	
<b>РУХОМОГО СКЛАДУ.....</b>	<b>97</b>
7.1 Електрична схема тролейбуса 3iY – 9.....	97
7.2 Електрична схема тягового електроприводу тролейбуса 14 TP.....	107
<b>8.ЗАХИСТ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....</b>	<b>113</b>
8.1 Загальні відомості .....	113
8.2 Захист від перевантажень та коротких замикань.....	114
8.3 Захист від підвищення та зниження напруги .....	117
8.4 Захист радіоприйому від перешкод .....	119
8.5 Захист від буксування коліс транспортних засобів .....	120

## ***ВСТУП***

Найбільш поширеними видами транспорту є електричний транспорт (трамвай, тролейбус, метрополітен, електромобіль), що використовує для тяги електричну енергію і автомобільний, що приводиться в рух двигуном внутрішнього згорання.

Головне завдання транспорту полягає в повному і своєчасному задоволенні потреб населення в перевезеннях. Знання теорії і конструкції електричного обладнання дозволяє вирішувати питання підвищення ефективності, надійності й безпеки роботи рухомого складу транспорту. Ефективність роботи транспорту повинна зростати не тільки внаслідок створення нових типів рухомого складу, але й в результаті підвищення надійності, поліпшення тягових, гальмових і техніко-економічних характеристик існуючого.

Цей конспект лекцій складений відповідно до програми дисципліни "Електричне обладнання транспортних засобів", яка викладається для студентів спеціальності „Електричні системи і комплекси транспортних засобів” у Харківській національній академії міського господарства.

## ***1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА І КЛАСИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ***

### ***1.1. Класифікація електричного транспорту***

Залежно від призначення електричний транспорт можна розділити на магістральний, міський і промисловий.

Магістральний – це в основному залізничний транспорт, який виконує перевезення вантажів і пасажирів на відносно великі відстані з використанням електровозів, тепловозів та електропоїздів.

Промисловий електричний транспорт виконує перевезення різноманітних вантажів по території промислового підприємства. Цей транспорт може бути різноманітним: якщо це відкрита розробка – цей транспорт близький до магістрального (промислові тепловози й електровози, тягові агрегати, самохідні думпкери); якщо це машинобудівельний завод, де використовуються електрокари, автозавантажувальники – цей транспорт близький до міського.

Міський електротранспорт застосовують для перевезення пасажирів у містах. Найбільш розповсюдженим міським електротранспортом є трамвай і тролейбус, а у найбільш великих містах використовують метрополітен.

Електротранспорт може бути автономним, коли джерело електроенергії (дизель-генератор, акумуляторна батарея, паливні елементи) встановлюється безпосередньо на рухомому складі - це електробуси (автобус з двигуном внутрішнього згорання та електричною передачею), електромобілі, тепловози.

Перевагами такого виду транспорту є те, що він не потребує контактної мережі, а недоліком те, що джерело живлення має велику вагу й обмежену потужність, що зменшує його провізну спроможність або радіус дії.

Контактний транспорт забезпечується живленням від контактної мережі, не має недоліків автономного транспорту, але може працювати лише тільки там, де є контактна мережа.

У цьому відношенні найкращі показники повинен мати комбінований транспорт, який може одержувати живлення як від контактної мережі, так і від автономного джерела живлення. Але дорожнеча, велика маса електрообладнання, складність виготовлення не дозволяють широко використовувати цей вид транспорту.

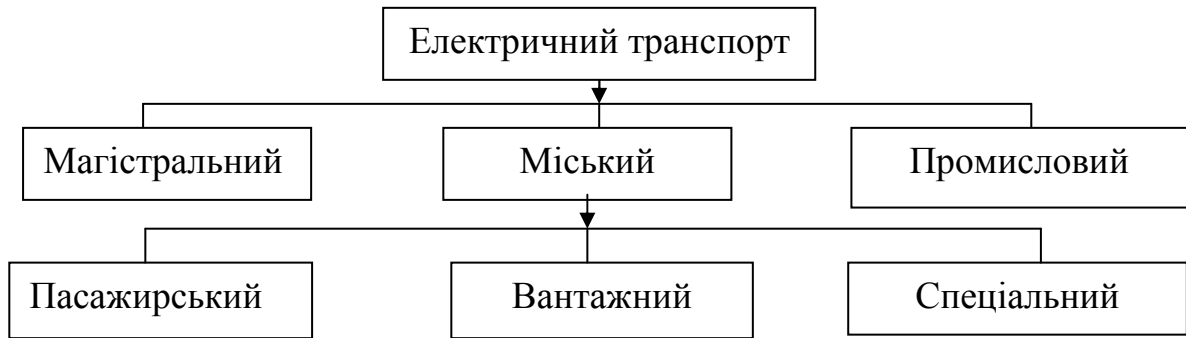
Електротранспорт може бути рейковим і безрейковим. Останній більш маневрений, але потребує наявності доріг з якісним покриттям і використовує більш електроенергії. В умовах міста доцільно застосовувати рейковий транспорт для швидкісного трамваю або метрополітену, бо в цьому разі рейковий шлях не займає проїзну частину вулиці і не обмежує рух автомобільного транспорту.

Контактний електричний транспорт може бути виконаний як із живленням на постійному струмі, так і на змінному струмі промислової частоти. Останній використовують на магістральних залізничних коліях з напругою в контактній мережі 25 кВ. В умовах міста за правилами електробезпеки використання напруги більше 1000 В у повітряній контактній мережі заборонено. А при такому рівні напруги використання змінного струму малоефективне через високу індуктивність контактної мережі. Класифікація електричного транспорту надана на рис.1.1.

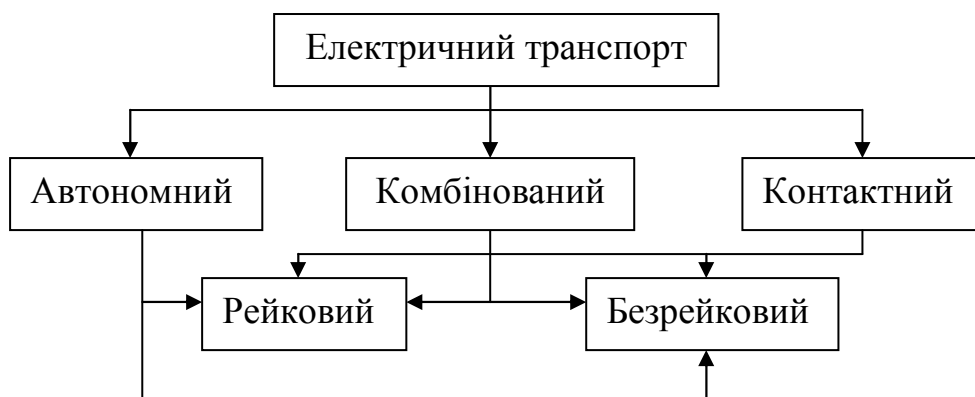
В Україні на міському електротранспорті використовують постійний струм напругою 600 В для трамваїв і тролейбусів і 825 В для метрополітену, за кордоном – 550-750 В постійного струму для трамваїв і 750-1100 В – для метрополітену.

На електричному рухомому складі можуть застосовуватись тягові електродвигуни (ТЕД) як постійного струму, так і безколекторні двигуни змінного струму (синхронні або асинхронні). Використання безколекторних ТЕД потребує застосування статичних перетворювачів, що ускладнює електричну схему рухомого складу. Але такі ускладнення виправдовуються за рахунок того, що тягові електричні двигуни змінного струму мають значно вищу надійність порівняно з машинами постійного струму.

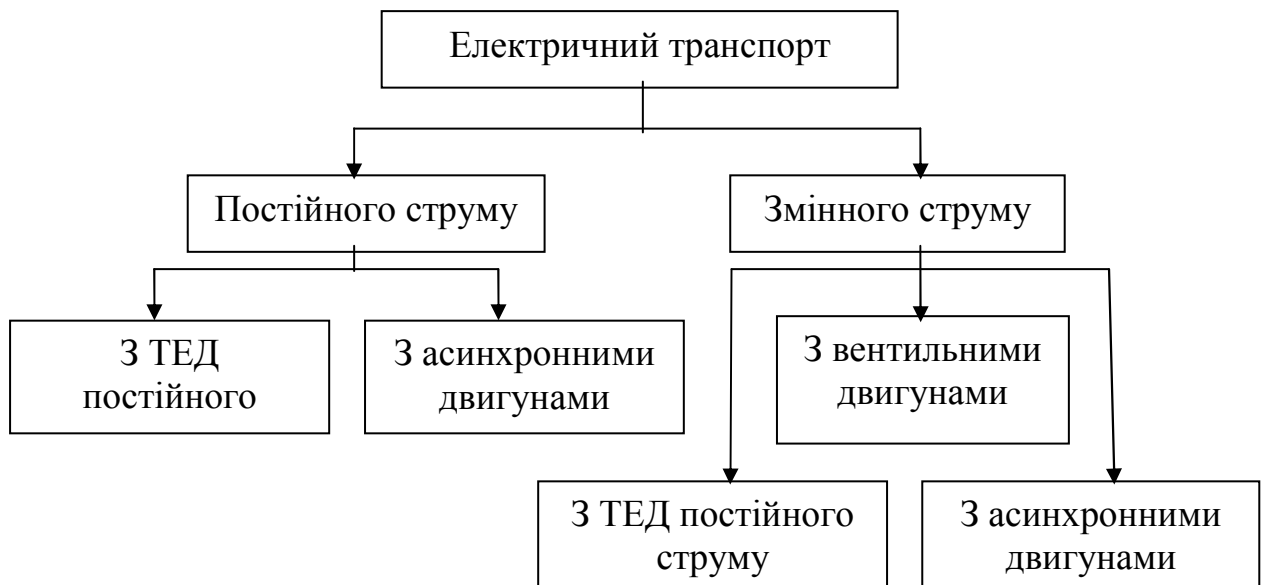
Класифікація міського електричного транспорту надана на рис. 1.2.



а) за призначенням



б) за конструктивним виконанням



в) за системою живлення

Рис. 1.1- Класифікація електричного транспорту

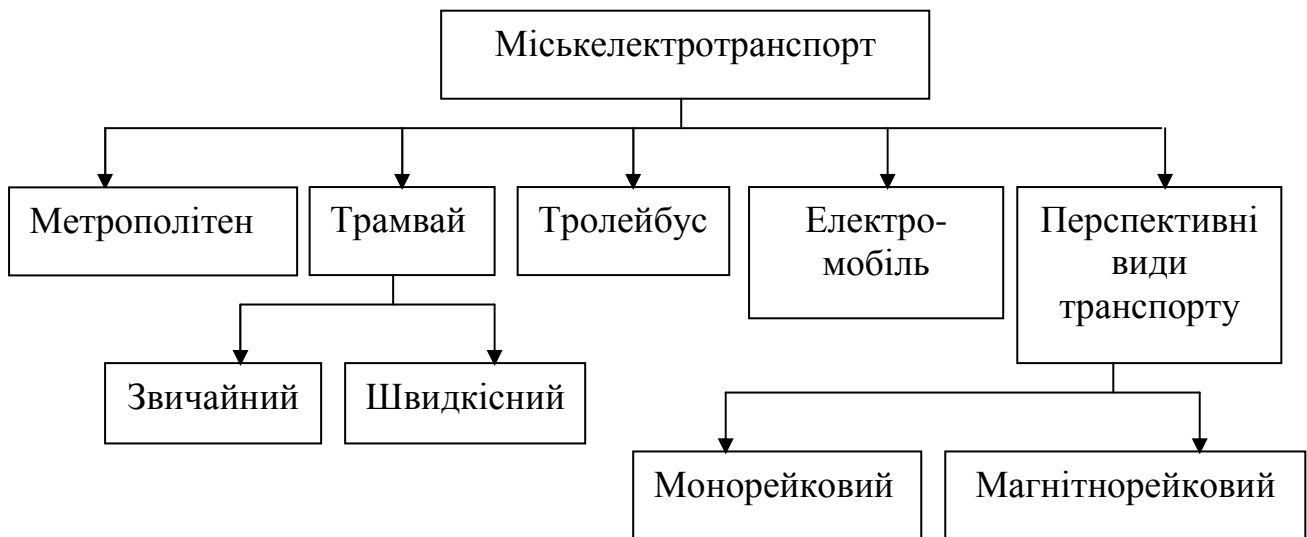


Рис. 1.2 - Класифікація міського електричного транспорту

### 1.2. Класифікація автомобільного транспорту

*Автомобільний рухомий склад за призначенням поділяють на:*

- ◆ вантажний;
- ◆ пасажирський;
- ◆ спеціальний.

*До вантажного автомобільного рухомого складу належать:*

- ◆ вантажні автомобілі;
- ◆ автомобілі-тягачі;
- ◆ причеи;
- ◆ напівпричеи.

*Вантажні автомобілі за характером використання бувають:*

- ◆ загального призначення, кузови яких мають форму бортової платформи;
- ◆ спеціалізовані, кузови яких пристосовані для перевезення тільки певних вантажів (самоскиди — для перевезення сипких і в'язких вантажів, цистерни — для транспортування рідких вантажів, рефрижератори — для перевезення швидкопсувних вантажів).

*За конструктивною схемою розрізняють:*

- ◆ одиночні вантажні автомобілі;
- ◆ автопоїзди (тягач із причепом, напівпричепом).

*За вантажопідйомністю вантажні автомобілі поділяють на такі класи:*

- ◆ особливо малої вантажопідйомності (до 0,5 т);
- ◆ малої (0,5...2 т);
- ◆ середньої (2...5 т);

- ♦ великої (5... 15 т);
- ♦ особливо великої (понад 15 т).

*За повною масою вантажні автомобілі поділяють на сім класів:*

1) до 1,2 т; 2) 1,3...3; 3) 3...5; 4) 5...8; 5) 8...16; 6) 16...40; 7) понад 40 т.

*До пасажирського автомобільного рухомого складу належать:*

- ♦ легкові автомобілі, що призначаються для перевезення пасажирів (від 2 до 8, ураховуючи водія) і багаж;
- ♦ автобуси, які призначаються для перевезення 9 і більше чоловік (ураховуючи водія).

*Залежно від робочого об'єму циліндра двигуна (л) розрізняють п'ять класів легкових автомобілів:*

- ♦ особливо малий (1,2 л);
- ♦ малий (1,3...1,8 л);
- ♦ середній (1,9...3,5 л);
- ♦ великий, (понад 3,5 л);
- ♦ найвищий (не регламентується).

*Автобуси за призначенням поділяють на:*

- ♦ міжміські;
- ♦ міські;
- ♦ місцевого сполучення.

Окрему групу становлять туристичні автобуси.

*За довжиною автобуси поділяють на такі класи:*

- ♦ особливо малі (до 5 м);
- ♦ малі (6...7,5 м);
- ♦ середні (8...9,5 м);
- ♦ великі (10,5...12 м);
- ♦ особливо великі (16,5 м та більше).

До спеціального автомобільного рухомого складу належать автомобілі, причеи й напівпричеи для нетранспортних робіт, відповідно обладнані (санітарні, пожежні, сміттєзбиральні, автокрани, автомобілі-автовишки тощо).

*Автомобілі всіх типів за пристосованістю до роботи в різних дорожніх умовах поділяють на дві групи:*

- ♦ автомобілі нормальної (звичайної) прохідності, що призначаються для руху по вдосконалених дорогах (мають один ведучий міст);
- ♦ автомобілі підвищеної прохідності, які призначаються для роботи у важких дорожніх умовах або навіть в умовах бездоріжжя (в них усі мости й колеса ведучі).

Щоб розрізнати автомобілі за вказаною ознакою, використовують так звану «колісну формулу». Це умовна характеристика ходової частини автомобіля, в якій перша цифра відповідає загальній кількості коліс, а друга — кількості ведучих коліс: 4 х 2, 6 х 4 (автомобілі нормальної прохідності); 4х4, 6х6 (автомобілі підвищеної прохідності).



### *Контрольні запитання:*

1. Як класифікується електричний та автомобільний транспорт за призначенням?
2. Що таке комбінований електричний транспорт, де він використовується?
3. Яке призначення має міський електричний транспорт?
4. Яка напруга використовується на транспорті з живленням від контактної мережі?
5. Чому не використовується живлення змінним струмом на міському електричному транспорті?
6. Який тип тягових електричних двигунів доцільно застосовувати на міському електричному транспорті з точки зору надійності?
7. Які переваги і недоліки має автономний електричний транспорт?
8. Що таке «колісна формула» автомобіля?
9. Як поділяють автобуси за довжиною?

## **2. ВИМОГИ ДО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТРАНСПОРТУ І ЙОГО КЛАСИФІКАЦІЯ**

Електричні двигуни, тягові електричні апарати, системи керування та джерела живлення складають тягове електричне обладнання рухомого складу. Вимоги до електричного обладнання залежать від умов його роботи. Порівняно з електрообладнанням стаціонарних установок тягове електричне обладнання рухомого складу працює в більш важких умовах і до нього застосовуються наступні вимоги:

1. Через нерівності поверхні доріг, стиків рейок, а також коливань та вібрації механічної частини рухомого складу електрообладнання працює при частих ударних навантаженнях. Це потребує підвищеної механічної та електричної стійкості деталей та вузлів електрообладнання і високої надійності їх кріплення. Для зменшення ударних навантажень необхідно, щоб все електрообладнання було підресорним.
2. При роботі рухомого складу в електрообладнання потрапляють вологе повітря, вода, сніг і воно забруднюється. Тому потрібно, щоб ізоляційні деталі мали вологостійку ізоляцію, а всі металеві деталі були захищені антикорозійним покриттям.
3. Номінальна напруга, що застосовується на електротранспорті, вища ніж в більшості промислових установок. Це підвищує вимоги до комутаційної надійності тягових електродвигунів і допоміжних електричних високовольтних електричних машин. Ці машини повинні бути розраховані на роботу з перехідними режимами, які пов'язані зі зміною напруги в контактній мережі, проїздом спецчастин та роботою електрообладнання.

4. Електричний рухомий склад працює з різним навантаженням на змінному профілі; параметри повітря (вологість і температура), яке охолоджує електрообладнання, можуть мати широкий діапазон значень, що приводить до широкого діапазону зміни опорів обмоток та струмопровідних частин електроустаткування. Тягові електродвигуни і електричні апарати повинні надійно працювати при самих негативних збігах температури обмоток і напруги в контактній мережі.

5. Простір для розміщення і монтажу електрообладнання на рухомому складі обмежений. Тому тягове електроустаткування повинно мати мінімальні габаритні розміри і масу.

6. Відмова в роботі електрообладнання на лінії (особливо рейкового транспорту) призводить до зриву графіку руху. Тому електрообладнання повинно мати високу надійність і добрий доступ для обслуговування та ремонту. Конструкція електрообладнання повинна дозволяти швидко заміну несправних деталей та вузлів на відремонтовані.

За своїм призначенням тягове електрообладнання можна розділити на такі групи:

а) тягові електродвигуни.

б) тягові електричні апарати.

в) допоміжні електричні машини.

г) джерела живлення електричних кіл управління, освітлення та сигналізації.

В електрообладнання автономного і комбінованого рухомого складу входять автономні джерела живлення тягових електродвигунів (тягова акумуляторна батарея або тяговий генератор з пристроями для регулювання напруги).

За системою збудження розділяють електродвигуни послідовного, змішаного, паралельного і незалежного збудження. Найбільш пристосованими для умов тяги є ТЕД послідовного збудження. Вони мають такі переваги порівняно з двигунами паралельного збудження:

- тягові характеристики дозволяють краще використовувати рухомий склад та пристрої електропостачання в умовах змінних навантажень;

- при паралельній роботі двигунів більш рівномірно розподіляється навантаження між двигунами внаслідок "м'яких" швидкісних характеристик;

- значно краще працюють у перехідних режимах через більшу комутаційну стійкість до появи колового вогню;

- при однаковій потужності мають меншу вагу і габаритні розміри за рахунок зменшення об'єму ізоляції обмотки послідовного збудження.

Двигуни паралельного збудження не використовують як тягові, тому що мають різні значення постійних часу кіл якоря та обмотки збудження. Тому при перехідних процесах зміна магнітного потоку значно відстає від струму якоря, що призводить до виникнення колового вогню.

Двигуни змішаного збудження займають проміжне положення між двигунами послідовного та паралельного збудження. Їх широке використання обумовлене в першу чергу простотою регулювання частоти обертання за рахунок використання шунтової обмотки (порівняно з двигунами послідовного збудження) та можливості переходу в гальмівний режим без ускладнення схеми силового кола.

На рухомому складі електричного транспорту застосовують електричні апарати, які можна розділити на такі групи:

- а) струмоприймачі;
- б) резистори й індуктивні шунти;
- в) апарати з індивідуальним приводом (контактори з електромагнітним та електропневматичним приводом, вимикачі, роз'єднувачі і т.п.);
- г) апарати з груповим приводом (реверсори, гальмівні реостатні перемикачі, контролери управління);
- д) апарати захисту та управління (реле, автоматичні вимикачі, запобіжники, розрядники);
- е) апарати кіл живлення та сигналізації (реле-регулятори, для регулювання і захисту зарядного генератора, кнопки, арматура кіл сигналізації).

Більшість апаратів з індивідуальним приводом виконують на базі стандартних електричних апаратів для промислових установок.

Конструкція групових електричних апаратів тісно пов'язана з принципами побудови силової схеми та схем управління, тому вони мають різне виконання для конкретних типів рухомого складу.

Групові приводи дозволяють спростити електрообладнання та підвищити його надійність, але на деяких типах рухомого складу групові приводи можуть бути відсутні (наприклад, електрична схема трамваю Т-3).

При регулюванні ТЕД системи управління повинні виконувати такі функції:

- 1) підключення ТЕД до контактної мережі і відключення від неї за бажанням водія або автоматично (при перевантаженнях, коротких замиканнях, зникненні напруги в контактному дроті, перевищенні напруги більше за допустиму величину);
- 2) перемикання ступенів пуску – гальмівних резисторів;
- 3) перемикання ступенів у колі збудження ТЕД, для зміни його магнітного потоку;
- 4) перемикання ТЕД з однієї групи на іншу;
- 5) перемикання ТЕД з тяги на гальмування і навпаки;
- 6) вмикання режиму гальмування та перемикання з одного виду гальмування на інше;
- 7) зміна напрямку руху рухомого складу (реверсування);
- 8) відключення частини двигунів при аварійних режимах.

Перераховані операції передбачаються не на всіх типах рухомого складу.

Наприклад, на тролейбусах та деяких типах трамваїв не передбачається перегрупування ТЕД, не на всіх типах рухомого складу є аварійні силові схеми.

Системи управління ТЕД залежно від виду пускових пристроїв розподіляють на ступінчаті й плавні, а від способу вмикання електричних апаратів - на системи безпосереднього і дистанційного керування.

Систему управління необхідно будувати з урахуванням наступних вимог:

- операції з управління ТЕД повинні виконуватися простими і легкозапам'ятовуваними рухами (рукоятками або педалями контролера керування), причому одночасно не можна використовувати більше однієї педалі або рукоятки;

- всі рукоятки й педалі повинні бути заблоковані, щоб виключити можливість помилкових рухів та забезпечити при будь-яких умовах більш безпечний режим - гальмування;

- відмова в роботі будь-якого електричного апарату не повинна викликати виникнення замість гальмівного режиму тягового;

- апарати і всі з'єднувальні кола повинні працювати надійно;

- повинно бути забезпечено максимальне спрощення роботи водія – легке й доступне обслуговування електрообладнання в експлуатації;

- забезпечення мінімальних габаритів та ваги електричного обладнання, а також мінімальної ціни системи управління і витрат на обслуговування.

#### *Контрольні запитання:*

1. Як класифікується тягове електрообладнання рухомого складу за призначенням?
2. В яких умовах працює тягове електрообладнання транспорту?
3. Для чого електрообладнання рухомого складу виконують підресорним?
4. Як класифікують тягові електричні апарати?
5. Які функції повинні виконувати системи управління ТЕД?

### **3. СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТЧАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

#### **3.1. Загальні відомості**

Система електропостачання призначена для живлення електричною енергією всіх споживачів. Джерелами електричної енергії на рухомому складі є генератор і акумуляторна батарея, що включені паралельно один одному.

При працюючому двигуні генератор є основним джерелом електроенергії й забезпечує електропостачання споживачів і заряд акумуляторної батареї. При непрацюючому двигуні функції джерела електроенергії переходять до акумуляторної батареї, що також повинна забезпечувати надійний пуск двигуна.

Автомобільні генератори працюють у режимах змінних частот обертання й навантажень, що змінюються в широких межах. Для автоматичної підтримки напруги генератора на заданому рівні при зміні частоти обертання й навантаження

призначене регулятор напруги. Структурна схема системи електропостачання надана на рис. 3.1.

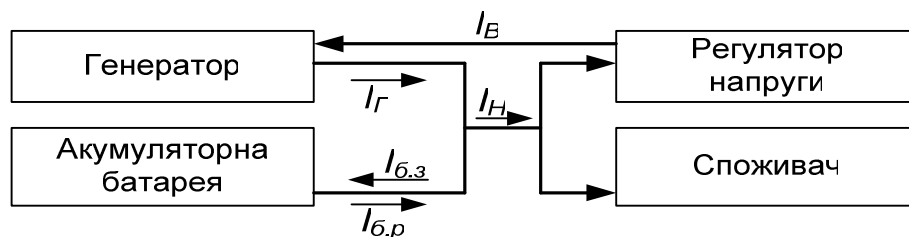


Рис. 3.1- Структурна схема системи електропостачання

Для наведеної на рис. 3.1 структурної схеми справедливий наступний взаємозв'язок струмів при різних співвідношеннях напруг генератора та акумуляторної батареї:

$$I_r = I_{б.з.} + I_n \text{ при } U_r > E_{б.}; \quad I_r = I_n \text{ при } U_r = E_{б.}; \quad I_r + I_{б.р.} = I_n \text{ при } U_r < E_{б.};$$

$$I_{б.р.} = I_n \text{ при } U_r = 0.$$

де  $U_r$  - напруга генератора;  
 $E_{б.}$  - ЕРС акумуляторної батареї;  
 $I_r$  - струм генератора;  
 $I_{б.з.}$  - струм, що споживається батареєю при заряді;  
 $I_n$  - струм, що споживається споживачами;  
 $I_{б.р.}$  - струм, що віддається батареєю при розряді.

### 3.2. Допоміжні генератори

Довгий час основним джерелом електричної енергії на рухомому складі були генератори постійного струму, які забезпечували вимоги експлуатації рухомого складу випуску до 60-х років по максимальній потужності, характеристикам і терміну служби.

Початок 60-х років вже характеризувався значним збільшенням терміну служби рухомого складу, зниженням експлуатаційних витрат на обслуговування і ремонт, підвищенням вимог до безпеки дорожнього руху і комфорту пасажирів. У зв'язку з цим виявилася необхідність значного збільшення потужності генератора, строку його служби, поліпшення характеристик і зниження експлуатаційних витрат. Одночасно істотно підвищилися вимоги по максимальній частоті обертання і габаритних розмірів генератора виходячи з умов його компонування в обмеженому підкапотному просторі автомобіля.

Задоволення зазначених вимог шляхом удосконалювання конструкції і технології виробництва генераторів постійного струму, з огляду на низьку надійність роботи в експлуатації щітково-колекторного вузла і малий строк його

служби, а також більші габарити і вага генератора, практично виявилось нездійсненим. За допомогою наукового пошуку і досліджень був визначений новий напрямок у розвитку допоміжних генераторів. Ними з'явилися генератори змінного струму.

Назва «генератор змінного струму» трохи умовна і стосується в основному особливостей внутрішньої конструкції генератора, тому що ці генератори мають убудовані напівпровідникові випрямлячі і живлять споживачів постійним (випрямленим) струмом. У генераторах постійного струму таким випрямлячем є щітково-колекторний вузол, що здійснює випрямлення змінного струму, отриманого в обмотках якоря. Розвиток напівпровідникової техніки дозволив застосувати в генераторах змінного струму випрямляч на напівпровідникових вентилях (діодах). При цьому генератор одержав якості, які забезпечили йому широке поширення в автомобілебудуванні.

Основними техніко-економічними перевагами генераторів змінного струму перед генераторами постійного струму є: зменшення в 1,8...2,5 рази маси генератора при тій же потужності й приблизно в 3 рази витрат міді; більша максимальна потужність при однакових габаритах; менше значення початкових частот обертання й забезпечення більш високого ступеня зарядженості акумуляторних батарей; значне спрощення схеми й конструкції регулюючого пристрою внаслідок виключення з нього елемента обмеження струму і реле зворотного струму; зменшення вартості експлуатаційних витрат у зв'язку з більшою надійністю роботи і підвищеним терміном служби.

Перші генератори змінного струму були спроектовані для роботи з окремими селеновими випрямлячами і вібраційними регуляторами напруги. Селенові випрямлячі мали значні розміри і їх доводилося розміщати окремо від генератора в місцях, де забезпечувалося їхнє ефективне охолодження. Для з'єднання селенового випрямляча з генератором була потрібна додаткова проводка. Крім того, селенові випрямлячі недостатньо теплостійкі й допускають максимальну робочу температуру не вище  $+80^{\circ}\text{C}$ . Тому надалі селенові випрямлячі були замінені випрямлячами, що складаються із кремнієвих діодів, які більш теплостійкі й мають значно менші розміри, що дозволяє розміщати їх усередині генератора. На зміну вібраційним регуляторам напруги прийшли спочатку контактно-транзисторні, а потім безконтактні на дискретних елементах і безконтактні інтегральні регулятори. Габарити інтегральних регуляторів дозволяють вбудовувати їх у генератор, що з убудованими регулятором і випрямним блоком називається генераторною установкою.

Для генераторів надійність і термін служби визначаються в основному трьома факторами:

- якістю електричної ізоляції;
- якістю підшипникових вузлів;
- надійністю щітково-контактних пристроїв.

Перші два фактори залежать від рівня розвитку суміжних виробництв. Третій фактор може бути виключений за допомогою розробки безконтактних генераторів, що мають більше високу надійність і, отже, більший ресурс, чим

контактні. Ця обставина стимулювала створення автомобільних безконтактних генераторів змінного струму з електромагнітним збудженням - індукторних генераторів і генераторів з укороченими полюсами.

Індукторні генератори знайшли широке застосування на тракторах і сільгоспмашинах завдяки простоті конструкції, надійності в роботі в тяжких умовах експлуатації (пил, бруд, волога, вібрації й т.п.) і невисокої вартості.

### 3.3. Характеристики генераторів змінного струму

Зовнішня характеристика, тобто залежність напруги генератора від струму  $U_r$  ( $I_r$ ) при  $n = \text{const}$ , може визначатися при самозбудженні та незалежному збудженні.

Аналітичний вираз залежності напруги від струму для фазних величин має такий вигляд:

$$U = 4,44 f \omega k_{\phi} \Phi - Z_0 I, \quad (3.1)$$

де  $Z_0$  - повний опір генератора.

Зниження напруги при збільшенні навантаження відбувається через падіння напруги в активному й індуктивному опорах обмоток статора та розмагнічуючої дії реакції якоря, яка зменшує магнітний потік у повітряному зазорі, через падіння напруги в ланцюзі випрямляча, а у випадку самозбудження додається падіння напруги на обмотці збудження. Із сімейства зовнішніх характеристик визначається величина максимального струму, що забезпечується при заданому або регульованому значенні напруги.

Швидкісна регульовальна характеристика  $I_b$  ( $n$ ) (рис. 3.2) звичайно визначається при декількох значеннях струму навантаження. Мінімальне значення струму збудження визначається при струмі навантаження генератора, рівному нулю, і максимальній частоті обертання. Швидкісні регульовальні характеристики дозволяють визначити діапазон зміни струму збудження зі зміною навантаження при постійній напрузі.

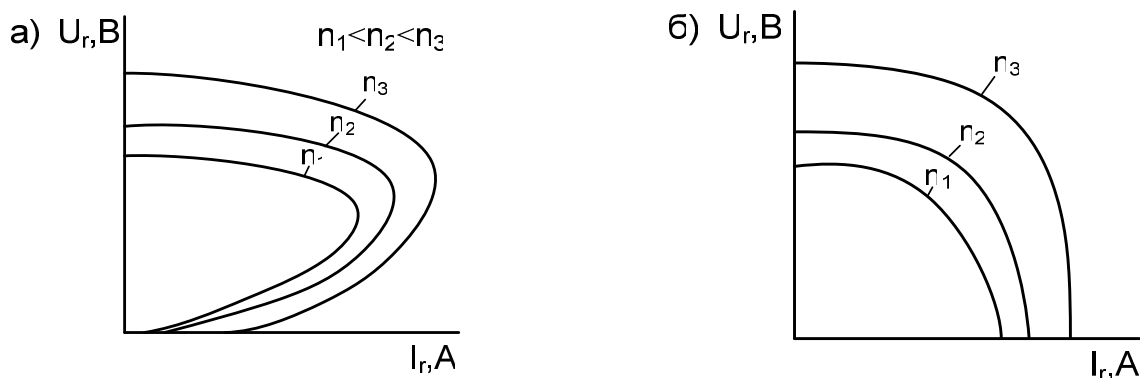


Рис. 3.2 - Зовнішня характеристика генератора змінного струму:  
а - із самозбудженням; б - з незалежним збудженням

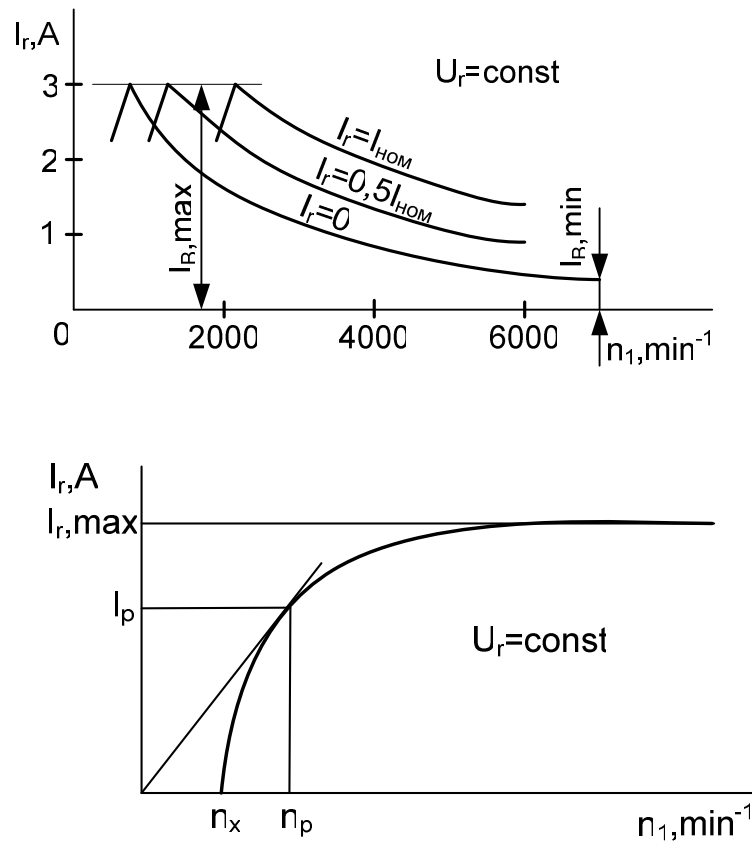


Рис. 3.3 – Струмошвидкісна характеристика генератора змінного струму

Струмошвидкісна характеристика  $I_m(n)$  (рис. 3.3) має важливе значення при розробці й виборі генератора.

Всі сучасні асинхронні генератори мають властивість самообмеження максимального струму. Це пов'язане з тим, що зі збільшенням частоти обертання ротора генератора, а отже, зі збільшенням частоти індукованого в обмотці статора змінного струму збільшується індуктивний опір обмотки статора генератора, пропорційно квадрату числа витків у фазі. Внаслідок цього зі збільшенням частоти обертання струм генератора збільшується повільніше, асимптотично прагнучи до деякого граничного значення. При замиканні зовнішнього кола на опір навантаження індукована в обмотці статора електрорушійна сила викликає струм

$$I = \frac{E}{\sqrt{(R_a + R_n)^2 + X^2 L}}, \quad (3.2)$$

де  $R_a$  - активний опір обмоток статора;  
 $R_n$  - опір навантаження.

Виразивши індуктивний опір статора через частоту й індуктивність, а потім через частоту обертання і індуктивність:



$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \frac{pn}{60} L = C_x n, \quad (3.3)$$

де  $C_x = \frac{2\pi p}{60} L$ , і з огляду на залежність (3.2), одержимо наступне рівняння для струму генератора:

$$I = \frac{C_e n \Phi}{\sqrt{(R_a + R_n)^2 + (C_x n)^2}}. \quad (3.4)$$

При малій частоті обертання індуктивна складова опору  $(C_x n)^2$  мала в порівнянні з активної складової  $(R_a + R_n)^2$  і нею можна зневажити. При цьому струм буде зростати пропорційно частоті обертання

$$I = \frac{C_e \Phi}{\sqrt{(R_a + R_n)^2 + (C_x n)^2}} \quad (3.5)$$

Зі збільшенням частоти обертання індуктивна складова зростає і стає значно більш активної складової, отже, останньою можна зневажити. При цьому струм буде дорівнювати постійній величині, що не залежить від частоти обертання, а обумовлений параметрами обмоток генератора і величиною магнітного потоку:

$$I = \frac{C_e n \Phi}{\sqrt{(C_x n)^2}} = \frac{C_e n \Phi}{C_x n} = \frac{C_e}{C_x} \Phi = const \quad (3.6)$$

### **3.4. Регулятори напруги**

На рухомому складі знайшли широке застосування регулятори напруги електромагнітного, електронного й змішаного типів.

З переходом на системи електропостачання з генератором змінного струму регулятори електронного і змішаного типів практично витиснули електромагнітні регулятори, які широко застосовувалися в основному з генераторами постійного струму. Причиною цьому з'явилися наступні обставини:

- струм збудження генераторів змінного струму в 1,5...2,0 рази вище чим генераторів постійного струму. Контакти електромагнітного регулятора напруги при таких струмах мають низьку надійність і невеликий термін служби;
- однієї з основних завдань, розв'язуваних при переході на генератори змінного струму, є підвищення терміну служби генераторної установки.
- електронний регулятор має термін служби до 200...250 тис. км пробігу, в той час як середній термін служби електромагнітного регулятора 120...150 тис. км пробігу;
- електронний регулятор не містить рухомих частин, що підгорають контактних поверхонь і пружин і тому не піддається розрегулюванню у процесі експлуатації, що характерно для електромагнітного регулятора.

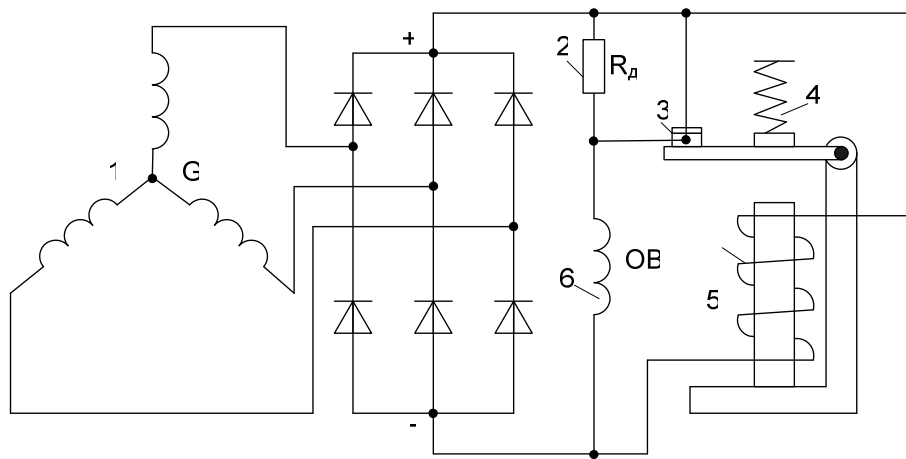


Рис. 3.4 - Принципова схема регулювання напруги генератора електромагнітним регулятором

Однак на деяких моделях автомобілів ще встановлюють електромагнітні регулятори, з огляду на їхню невисоку вартість. Значна їхня кількість застосовується на автомобілях, що перебувають в експлуатації.

На рис. 3.4 надана принципова схема регулювання напруги електромагнітним регулятором. Послідовно з обмоткою збудження 6 увімкнутий додатковий резистор 2, величина опору якого забезпечує регулювання на номінальну напругу при досягненні максимальної частоти обертання.

Паралельно додатковому резистору увімкнуті контакти 3. При непрацюючому генераторі під дією пружини 4 контакти замкнуті, тим самим додатковий резистор вимикається з кола збудження. Обмотка електромагніта 5 включена паралельно генератору. Сила притягання електромагніта залежить від струму

$$I_z = \frac{U}{R_0}, \quad (3.7)$$

де  $U$  - напруга генератора;

$R_o$  - опір обмотки електромагніта.

При постійному опорі струм пропорційний напрузі, отже, сила притягання залежить від напруги генератора. Притягання електромагніта протидіє зусилля пружини.

Зі збільшенням частоти обертання зростає ЕРС і напруга генератора перевищує регульоване значення. При цьому струм в обмотці електромагніта зростає, зусилля притягання збільшуються і контакти розмикаються. У ланцюг збудження включається опір додаткового резистора, що приводить до зменшення струму збудження, магнітного потоку, ЕРС і напруги генератора. Зниження напруги приводить до ослаблення зусилля притягання електромагніта і пружина замикає контакти. Додатковий резистор вимикається і напруга знову зростає, поки контакти знову не розімкнуться.

Для контактів електромагнітного регулятора напруги характерне іскріння, що робить на них руйнуючий вплив. Ступінь цього впливу характеризується розривною потужністю, рівної добутку напруги на контактах на струм збудження. Напруга на контактах, у свою чергу, дорівнює добутку струму збудження на величину опору додаткового резистора

$$P_k = I_s^2 R_o . \quad (3.8)$$

Для надійної роботи контактів розривна потужність не повинна перевищувати 150...200 В·А.

У розглянутих регуляторах напруги величину опору додаткового резистора не можна зменшити, тому що вона визначає максимальну частоту обертання, при якій можливе регулювання напруги. Зменшення струму збудження веде до збільшення габаритів і маси генератора. Зі зростанням потужності генератора штучне обмеження струму збудження стає все більш скрутним, тому застосовують або двоступінчастий регулятор, або розділяють обмотки генератора на дві паралельні галузі.

Як приклад двоступінчастого регулятора напруги електромагнітного типу може бути наданий реле-регулятор РР380 (рис. 3.5).

Контактна група РР380 містить нормально розімкнуту і нормально замкнуту пари, причому перекидаючий контакт розташований на якірці. Перший щабель контактної групи - нормально замкнуті контакти РН1 - включені між «плюсом» і клемою «Ш». Друга, щабель контактної групи - нормально розімкнуті контакти РН2 включені між клемою «Ш» і «мінусом».

Електромагнітний регулятор напруги містить одну обмотку РН, включену через резистор температурної компенсації  $R_T$  безпосередньо на напругу генератора.

Паралельно контактам першого щабля включений додатковий резистор  $R_d$  і дросель  $L$ . Дросель служить для зменшення швидкості наростання струму через контакти другого щабля РН2, полегшуючи їхню роботу.

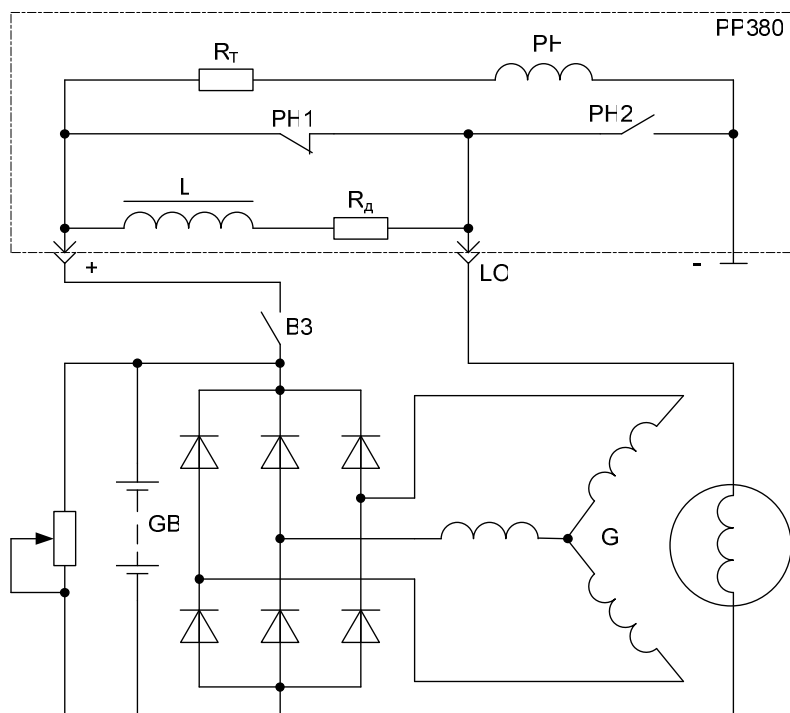


Рис. 3.5 - Реле-регулятор PP380

До моменту досягнення регульованої напруги якірець реле перебуває у вихідному положенні, тобто контакти РН1 замкнуті, і струм збудження визначається лише напругою генератора та опором обмотки збудження. При досягненні регульованої напруги електромагнітне зусилля, створене обмоткою РН, переборює зусилля пружини і контакти розмикаються. При цьому струм збудження пройде по додатковому резисторі, величина його зменшиться, отже, зменшиться й напруга. Таким чином, робота першого щабля аналогічна роботі звичайного електромагнітного регулятора. Відмінна риса схеми двоступінчастого регулятора полягає в тому, що паралельно контактам РН1 включається резистор, опір якого на 10...15 разів менше, ніж в одноступінчастих регуляторів. Опір додаткового резистора разом з незначним опором дроселя розраховано таким чином, щоб при частоті обертання, рівній половині максимальної, контакти першого щабля перестали замикатися, тобто регулювання напруги припинилося. При цьому струм збудження зменшується до 1,2...1,3А.

При подальшому збільшенні частоти обертання генератора напруга буде зростати до того моменту, поки не замкнуться контакти РН2. При їхньому замиканні обмотка збудження шунтується (тобто замикається накоротко). Струми збудження і напруги впадуть, при цьому контакти РН2 знову розімкнуться. Цей процес буде повторюватися з досить великою частотою. Регульовальна характеристика регулятора напруги PP380 надана на рис. 3.6.

Зменшення величини опору додаткового резистора робить двояку дію. З одного боку, звужується діапазон частот обертання, при яких контакти першої групи забезпечують стабільність напруги, з іншої, - різко знижується напруга на цих контактах, при цьому зменшується розривна потужність, що дозволяє підвищити максимальну величину струму збудження до 2,7А.

Підвищення регульованої напруги при переході з першого щабля на другий обумовлено перекиданням ярця реле. Цей стрибок перебуває в межах 0,2...0,7В.

Для збільшення струму збудження і терміну служби регулятора напруги були розроблені регулятори змішаного типу - контактно-транзисторні, у яких основний струм - струм збудження проходить через силовий транзистор, а роль контактів зводиться до комутування невеликого по величині струму керування транзистором. Принципова схема такого регулятора надана на рис. 3.7. На схемі транзистор VT1 працює в режимі ключа. Керуючим органом є контакти, що включені в ланцюг бази, а чутливим елементом - обмотка електромагніта, включена на напругу генератора.

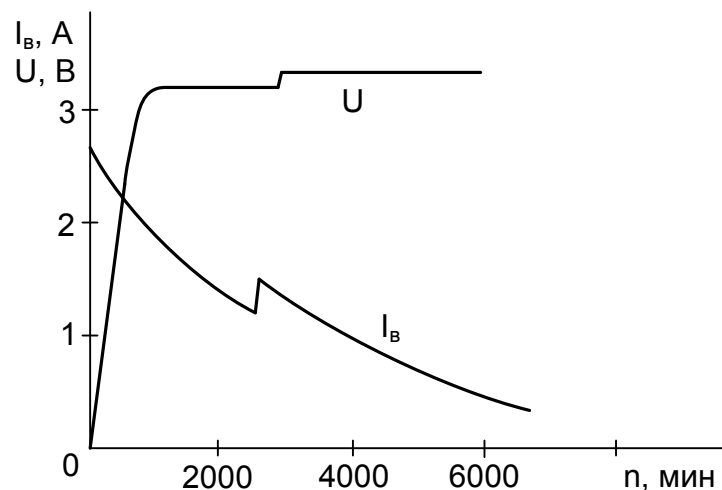


Рис. 3.6 - Регульовальна характеристика реле-регулятора РР380

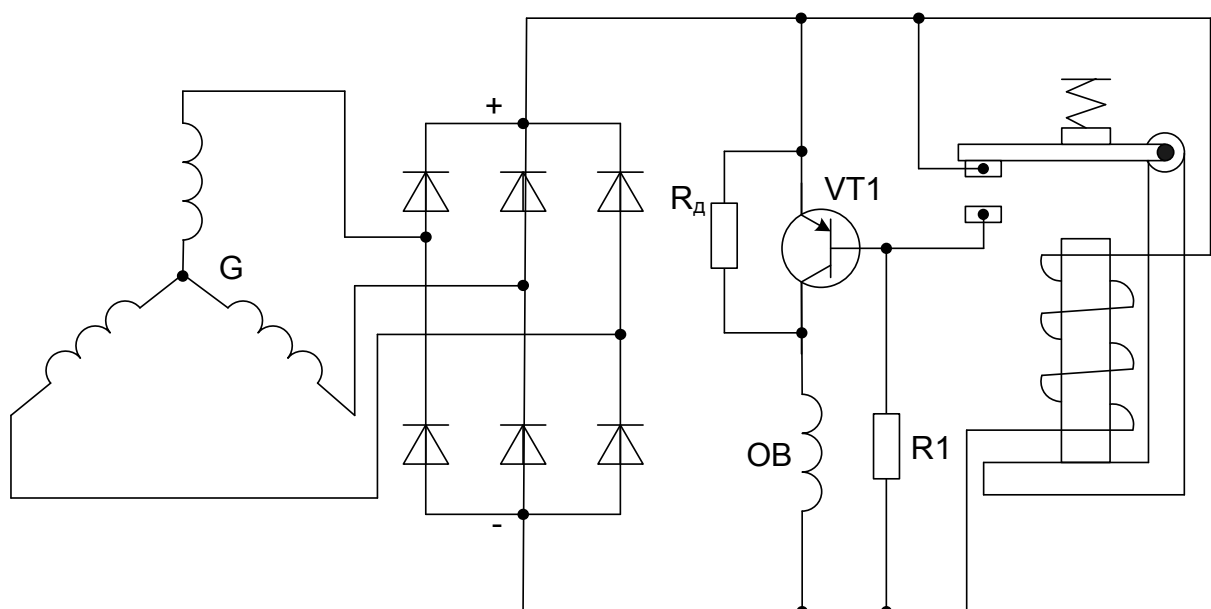


Рис. 3.7 - Принципова схема регулятора напруги змішаного типу

При напрузі генератора, меншій регульованої, транзистор VT1 відкритий, тому що є його струм бази. Опір кола збудження визначається лише

опором обмотки й зі збільшенням частоти обертання ротора напруга генератора зростає. При напрузі генератора вище регульованого зусилля електромагніта переборює опір пружини і контакти замикаються. У результаті цього шунтується перехід емітер - база, транзистор закривається та опір кола збудження збільшується, тому що струм збудження проходить по додатковому резисторі  $R_d$ . Зменшення струму збудження викликає зменшення магнітного потоку, ЕРС напруги, що у свою чергу приведе до ослаблення зусилля електромагніта, і контакти розімкнуться. Цей процес повторюється періодично і напруга генератора коливається біля регульованого значення.

Перевага контактно-транзисторних регуляторів полягає в тому, що контакти, будучи навантажені малим струмом, працюють у набагато більш легких умовах - не підгорають і не зношуються. Крім того, величина струму збудження визначається лише характеристиками транзистора і не впливає на працездатність контактів.

Недоліком регулятора змішаного типу є нестабільність регульованої напруги, тому що внаслідок старіння змінюються характеристики зворотної пружини регулятора. Тому в експлуатації цей регулятор, також як і електромагнітний, повинен періодично перевірятися.

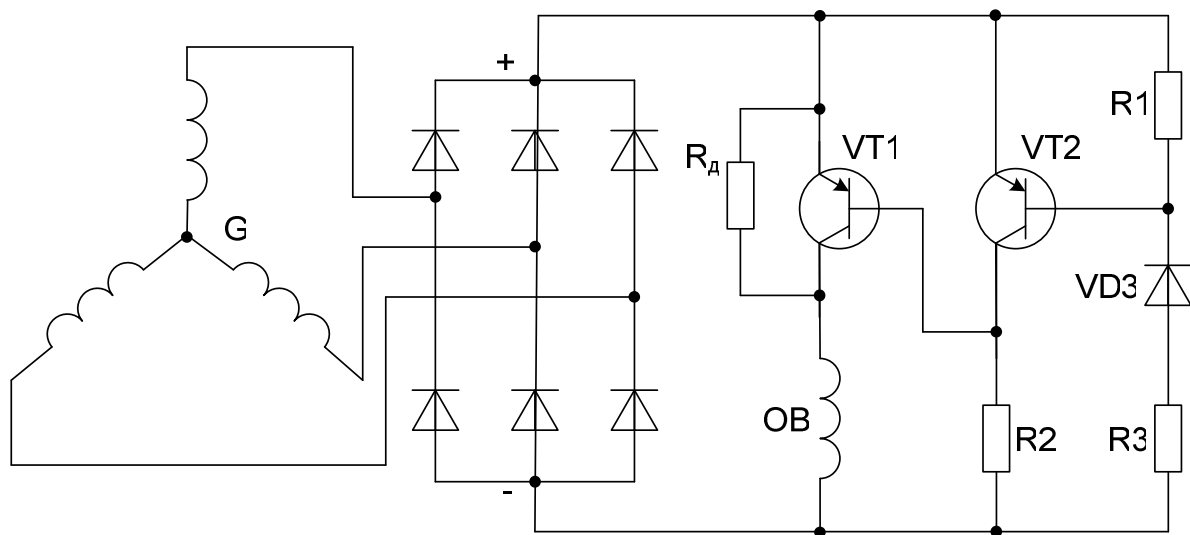


Рис. 3.8 - Принципова схема регулятора напруги електронного (безконтактного) типу

Ці недоліки повністю виключені в електронних регуляторах напруги (рис. 3.8), де в ланцюг збудження також включений транзистор, що працює в режимі ключа. Функцію чутливого елемента виконує стабілітрон  $VD3$ , чутливими елементами є резистори  $R2$  і  $R3$ .

При напрузі генератора нижче регульованої стабілітрон  $VD3$  закритий, закритий транзистор  $VT2$ , а транзистор  $VT1$  відкритий. Опір кола збудження мінімальний і зі збільшенням частоти обертання ротора напруга генератора збільшується. При напрузі генератора вище регульованої стабілітрон

пробивається, VT2 відкривається, що приводить до закриття VT1, тому що на його базу подається позитивний потенціал. У ланцюг збудження включається, додатковий резистор і напруга генератора падає. Зменшення напруги викликає запирання стабілітрона, закриття транзистора VT2 і відкриття транзистора VT1. Цей процес повторюється з великою частотою, у результаті напруга генератора коливається біля регульованого значення.

Електронні регулятори мають більш високу надійність і стабільність регульованої напруги, чим електромагнітні й змішані. Недоліком таких пристроїв є складність зміни в умовах експлуатації величини регульованої напруги.

До типових представників електронних регуляторів напруги можна віднести реле-регулятор PP350. Він містить три транзистори й стабілітрон як чутливий елемент (рис. 3.9).

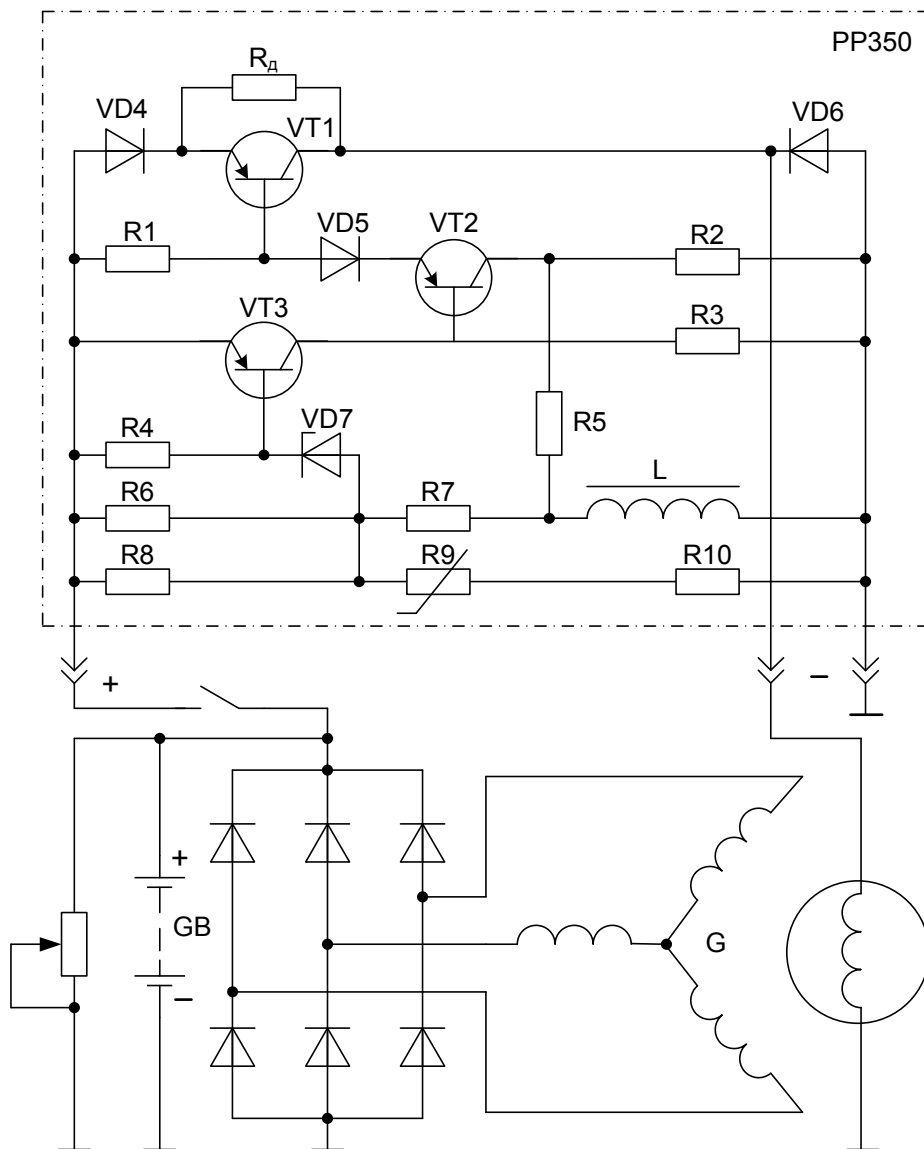


Рис. 3.9 - Реле-регулятор PP350

При напрузі на затискачах регулятора нижче регульованої напруги на стабілітроні VD7 не досягає величини стабілізації (пробою). Стабілітрон замкнений, виходить, замкнений транзистор VT3 (тому що відсутнє коло струму бази). Транзистор VT2 відкритий, тому що є струм бази, що протікає по

колу: клемка «+» → резистор R1 → діод VD5 → перехід емітер — база VT2 → резистор R3 → клемка → «- » → «маса». При цьому має місце струм бази транзистора VT1: клемка «+» → діод VD4 перехід «емітер-база» транзистора VT1 → VD → «емітер - колектор» транзистора VT2 → резистор R3 → клемка «—» → «маса». Через відкритий транзистор VT1 протікає струм збудження і напруга генератора зростає.

При досягненні регульованої напруги генератора напруга на стабілітроні VD7 стає рівною напрузі стабілізації. Стабілітрон пробивається, при цьому виникає коло струму бази транзистора VT3 клемка «+» → перехід емітер — база транзистора VT3 → стабілітрон VD7 → резистор R7 → дросель L → клемка «—» → «маса». Транзистор VT3 відкривається, і протікаючий через його емітерно - колекторний перехід струм збільшує падіння напруги на R3, у результаті чого різниця потенціалів емітера і бази транзистора VT2 різко зменшується. Транзистор VT2 закривається, перериваючи протікання струму через базу транзистора VT1. Транзистор VT1 закривається; струм збудження генератора, проходячи по резисторі R<sub>д</sub>, зменшується, викликаючи зниження напруги генератора, а отже, і напруги на стабілітроні. Як тільки вона стає нижче напруги стабілізації, стабілітрон закривається, а транзистори VT1 і VT2 відкриваються і напруга знову зростає.

*Призначення окремих елементів PP350 наступне.*

Діод VD4 - замикаючий діод, він служить для поліпшення умов запирання транзистора VT1. Особливість запирання транзисторів VT1 полягає в тому, що замикаюча напруга, що прикладається до входу транзистора VT1 через резистор R1, буде дорівнює різниці напруг на діоді VD4 і резисторі R1. Ясно, що зниження замикаючого зсуву через наявність напруги на R1 небажано. Однак це падіння напруги мале, тому що при замкнених транзисторах VT1 і VT2 струм, що протікає через R1, надзвичайно малий і величина замикаючого зсуву знижується незначно.

Діод VD5 служить для поліпшення умов запирання транзистора VT2, тобто його призначення й робота аналогічні діоду VD4. Таким чином, обоє германієвих транзисторів VT1 і VT2, застосовані в схемі PP350, мають замикаючі елементи, включені в емітерний ланцюг. Транзистор VT3 не має потреби в додатковому замикаючому елементі, тому що це кремнієвий транзистор, що володіє значно більшою тепловою стійкістю, чим германієві.

Дросель L служить для згладжування пульсацій напруги, що подається на вхід регулятора - стабілітрон VD7. Для напруги генератора змінного струму характерна наявність істотних пульсацій, обумовлених схемою випрямлення й специфікою магнітного кола генератора. При відсутності фільтра (у цьому випадку дроселя) стабілітрон буде спрацьовувати на пульсаціях, характер і частота яких міняються зі зміною режиму роботи генератора; тим самим буде спотворюватися регульовальна характеристика генератора.

Терморезистор R9 служить для компенсації підвищення опору дроселя й зміни характеристик напівпровідникових елементів у гарячому стані.



Підвищення температури приводить до збільшення опору міді обмотки дроселя, тобто до підвищення опору правого плеча дільника. Тому напруга генератора, при якому напруга на стабілітроні досягне величини стабілізації, збільшиться, тобто величина регульованої напруги в гарячому стані зростає. Підвищенню рівня регульованої напруги при нагріванні сприяє й деякий відхід характеристик стабілітрона, тому що напруга стабілізації зі збільшенням температури трохи зростає.

Терморезистори мають експонентну залежність опору від температури, що падає з ростом температури. Ланцюжок з R9 і R10, включено паралельно правому плечу дільника, вибирається таким чином, щоб результуючий активний опір цього плеча з підвищенням температури трохи знижувалося, тим самим знижується регульована напруга. При зміні температури 20 до 70°C напруга зменшується на 0,2...0,4В. Резистор позитивного зворотного зв'язка R5 необхідний для поліпшення якості фронтів перемикань схеми, тобто для форсування переходу транзисторів схеми з відкритого стану в закриті і навпаки. Зменшення часу фронтів потрібно не тільки для підвищення чіткості роботи регулятора, але головним чином для зниження потужності втрат у транзисторах, тобто для зниження їхнього перегріву.

Крім того, елементи зворотного зв'язка служать для зниження до оптимальної величини частоти перемикань. Без зворотного зв'язку частота перемикань буде визначатися пульсаціями силового випрямляча, які впливають на чутливий елемент регулятора навіть при наявності дроселя, хоча й у згладженому виді. Частота таких пульсацій велика - до декількох кілогерців. При роботі з такою частотою потужність втрат у транзисторі підвищується в кілька разів у порівнянні з роботою при наявності зворотного зв'язка, коли частота не перевищує 50...300 Гц.

Подальшим удосконалюванням електронних регуляторів з'явилося створення інтегральних регуляторів, які мають значно менші габарити і масу, чим їхні попередники. Інтегральні регулятори мають підвищені припустимі робочі температури, що дозволило вбудовувати їх у генератор і, отже, спростити схему електропроводки автомобіля і підвищити надійність генераторної установки за рахунок виконання з'єднань між генератором і регулятором напруги усередині генератора. Інтегральні регулятори забезпечують високу стабільність і точність регулювання напруги в бортовій мережі. Немаловажна і та обставина, що перехід на інтегральні регулятори дає значну економію металів, у тому числі дефіцитних кольорових.

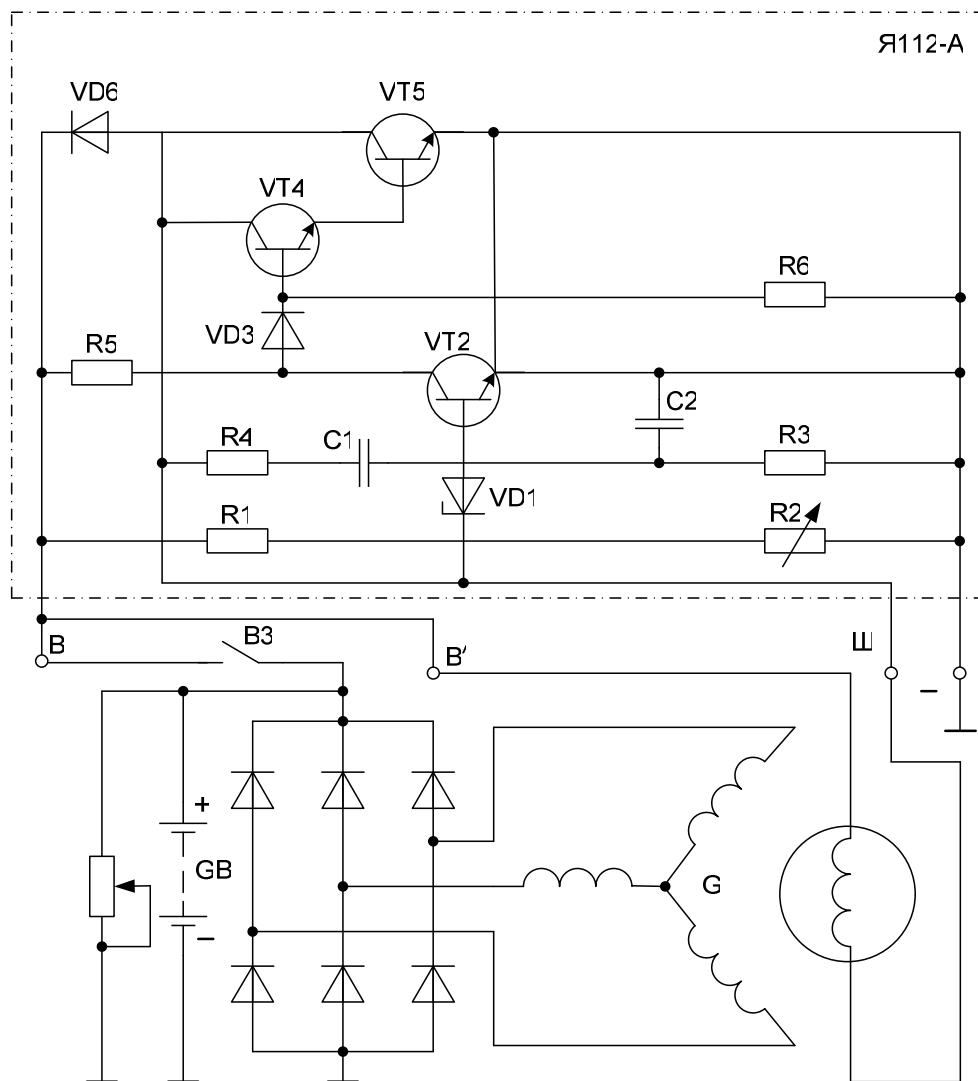


Рис. 3.10 - Регулятор напруги Я112-А

У цей час випускаються два типи інтегральних регуляторів напруги: Я112 на номінальну напругу 14В и Я120 - на 28В. Їхні габарити й маса в кілька разів менші в порівнянні з розглянутими регуляторами РР362 і РР350, а найбільша припустима робоча температура в 1,6 рази більша.

Регулятор напруги Я112-А (рис.3.10 ) конструктивно виконаний у такий спосіб. На металевій пластині - підставі регулятора змонтовані всі елементи схеми. Активні елементи виконані у вигляді захищених блоків, пасивні - по товстоплівковій технології на керамічній підкладці з двостороннім виконанням схеми.

При виготовленні схему набудовують на необхідний рівень напруги методом лазерного припасування. Схема заливається спеціальним герметиком і закривається пластмасовою кришкою. Регулятор має два вводи - «В» і «Ш», мінус на корпусі. Конструкція щіткотримача генератора змінена, обидві щітки ізолювані від маси.

Вихідний ланцюг регулятора складається із транзистора VT5, що перемикається за допомогою керуючого транзистора VT2 і проміжного

транзистора VT4. Роль чутливого елемента виконує стабілітрон VD1, підключений до вхідного високоомному ділянику напруги R1, R2.

Схема містить ланцюжок зворотного зв'язка R4, C1 для підвищення чіткості перемикання транзисторів і зменшення часу переходу схеми з одного стану в інший. Конденсатор C2 служить для фільтрації вхідної напруги, що надходить на транзистор VT2.

При напрузі в бортовій мережі нижче регульованого транзистори VT5 і VT4 відкриті, тому що має місце струм їхніх баз, що протікає по наступному ланцюзі: клемка «В» → резистор R5 → діод VD3 → база → емітер транзистора VT4 → база → емітер транзистора VT5 → клемка «-» → «маса». При цьому струм збудження проходить по наступному ланцюзі: клемка «В» → клемка «В» → обмотка збудження генератора → клемка «Ш» → колекторно - емітерний перехід транзистора VT5 → клемка «-» → «маса».

Як тільки напруга досягає заданого рівня, стабілітрон VD1 пробивається і транзистор VT2 відкривається. Опір цього транзистора стає мінімальним і шунтує емітерно - базовий перехід транзисторів VT5 і VT4, що приводить до їхнього запирання. Схема регулятора напруги перемикається в стан, при якому VT2 відкритий, а VT5 і VT4 замкнені. Струм збудження генератора й величина випрямленої напруги починають падати. При цьому стабілітрон закривається, транзистор VT2 закривається, транзистори VT5 і VT4 відкриваються й процес повторюється.

Діод VD3 служить для поліпшення запирання основного транзистора при відкритому транзисторі VT2 завдяки додатковому падінню напруги на цьому діоді.

Діод VD6 служить для гасіння ЕРС самоіндукції обмотки збудження генератора і захисту транзистора від перенапруги в момент його запирання.

Досвід масового використання мікроелектронних інтегральних регуляторів свідчить, що для забезпечення надійної роботи подібного пристрою в складних умовах експлуатації необхідне виконання ряду вимог. Зокрема, всі елементи схеми повинні допускати вплив найбільших перенапруг і струмових перевантажень, можливих у системі електропостачання не тільки в нормальних режимах, але й у так званих аномальних режимах (відключення батареї, тривала робота без батареї й т.п.); число контактів, виконаних шляхом термокомпресії або ультразвукового зварювання, повинно бути мінімальним, для підвищення надійності з'єднань їх варто дублювати. Регулятори повинні бути герметичні, але зміна обсягу герметика при температурних впливах, у тому числі при термоударах, припустимо в межах, при яких не порушуються елементи схеми й не погіршується герметичність виробу. При випускних випробуваннях кожний виріб, крім роботи (тренування) у граничному режимі, необхідно піддавати більше тривалому, чим у випадку «традиційних» регуляторів, впливу позитивної температури, чергуванню позитивної негативної температур (термоциклів) і т.п.

Подальший розвиток інтегральних регуляторів спрямовано на повне задоволення перерахованих вимог. Наприклад, надійність регуляторів буде

забезпечена за рахунок вихідних транзисторів, що допускають імпульсні перенапруги до 150...200В, спеціальної схеми керуючого кола й поліпшеного теплового контакту між елементами схеми і корпусом - тепловідводом. У деяких типах перспективних регуляторів передбачаються тонкоплівкові резистори, що володіють більш високою, ніж товстоплівкові, стабільністю, невеликим розкидом номіналів опорів і практично не змінюють своїх параметрів при впливі вологості, напруги й інших факторів; в інших генераторах - сполучення регуляторів із щіткотримачами, що спрощує конструкцію вузла, робить більш надійним з'єднання регулятора з ланцюгом обмотки збудження. Такими генераторами будуть комплектуватися практично всі нові вантажні й легкові автомобілі. Що стосується заміни на автомобілях діючого парку дискретних регуляторів напруги на інтегральні, то це досить складно й економічно недоцільно.

### **3.5. Акумуляторні батареї**

Акумуляторні батареї, що застосовуються в системі електроустаткування, є джерелами електричної енергії і забезпечують живлення споживачів при непрацюючому двигуні внутрішнього згорання або при недостатній потужності, яку розвиває генератор. Тип і конструкція акумуляторної батареї визначаються умовами її розряду в стартерному режимі при пуску двигуна. Оскільки ці режими найбільш важкі (максимальний струм і потужність), автомобільні акумуляторні батареї називаються стартерними.

Стартерний акумулятор являє собою хімічне джерело струму, тобто пристрій, в якому відбувається безпосереднє перетворення енергії хімічної реакції двох реагентів (окислювача і відновлювача) в електричну енергію. Причому він є там названим вторинним хімічним джерелом струму, що допускає багаторазове використання. Після розряду виробляється його повторний заряд шляхів пропускання струму від зовнішнього зарядного кола у зворотному напрямку. При цьому із продуктів реакції розрядженого акумулятора регенеруються вихідні активні матеріали. Таким чином, при заряді в акумуляторі з деяким КПД, що залежить від фізико-хімічних процесів, акумулюється енергія від зовнішнього джерела. На відміну від акумуляторів первинні хімічні джерела струму (гальванічні елементи) допускають лише однократний розряд і надалі не відновлюються.

До стартерних акумуляторних батарей пред'являються наступні основні вимоги:

максимальна робоча напруга, що визначається ЕРС одного акумулятора батареї і їхньою кількістю в послідовному з'єднанні;

мінімальна загальна маса;

мінімальний внутрішній опір (особливо при знижених температурах);

мала зміна напруги в процесі розряду;

максимальна кількість енергії, що віддається з одиниці маси;

швидке відновлення ємності в процесі заряду;

малі габарити і більша механічна міцність;  
надійність і простота обслуговування в експлуатації;  
мала вартість при масовому виробництві.

Найбільш повно перерахованим вимогам задовольняють свинцево-кислотні акумулятори, що одержали саме широке поширення в якості стартерних для автомобілів. Крім них у різних областях техніки також застосовуються лужні акумулятори: нікель - кадмієві, нікель-залізні, нікель-цинкові, срібно-цинкові і т.д.

Лужні акумулятори мають на 20...25% меншу ЕРС у порівнянні зі свинцево-кислотними і набагато менший ККД. Як електроліт у них використовують 35%-ний розчин їдкого калію (КІН) у дистильованій воді. У порівнянні з електролітом свинцево-кислотних батарей (30%-ний розчин кислоти  $H_2SO_4$ ) при однакових температурах він має меншу питому провідність, що приводить до більш високого внутрішнього опору лужного акумулятора.

В свинцево-кислотному акумуляторі щільність електроліту однозначно зв'язана зі ступенем його зарядженості при заданій температурі, що використовують для контролю ступеня зарядженості за допомогою денсиметрів. У лужних акумуляторах такої однозначної залежності не існує, тому визначення ступеня його зарядженості утруднено. Крім того, вони більше складні в експлуатації, тому що вимагають більшого обсягу технічного обслуговування і різноманітних контрольних операцій, пов'язаних із частою заміною електроліту (нікель-залізні батареї), періодичним зрівняльним дорозрядом (нікель-цинкові), добавкою в електроліт спеціальних присадок при зміні пір року, а також більше точним контролем процесу заряду (особливо моменту його закінчення). Деякі лужні акумулятори (срібно-цинкові, нікель - кадмієві та ін.) мають більшу вартість або використовують дефіцитні реагенти; що не дозволяє організувати їхнє масове виробництво.

На сучасному електрифікованому рухомому складі кола керування, освітлення, сигналізації й інших споживачів малої потужності отримують живлення від джерела струму, що складається з акумуляторної батареї і працює паралельно з зарядним пристроєм. Підзаряджається акумуляторна батарея зазвичай від генератора власних потреб.

Можливе застосування як кислотних акумуляторних батарей, так і лужних. Кислотні акумулятори мають більш високу напругу елемента, тому при заданій напрузі батареї потрібне менше число акумуляторів і менша відносна різниця напруги при заряді і розряді. Завдяки цьому зменшуються межі коливань напруги у ланцюзі споживачів при роботі акумуляторної батареї паралельно з зарядним генератором за системою постійного підзаряду. У кислотних акумуляторів трохи вище коефіцієнт віддачі і ККД.

Перевагою лужних акумуляторів є велика надійність і механічна міцність, більший термін служби, нечутливість до перезарядів, перевантаженням і навіть коротким замиканням, більш просте обслуговування, менше зниження ємності при низьких температурах (нижче  $0^{\circ}C$ ) і великих навантаженнях, менший саморозряд, відсутність шкідливих виділень при

роботі акумулятора. Тому на рухомому складі тролейбуса переважно застосовуються лужні акумуляторні батареї.

Залежно від складу активної маси електродів лужні акумулятори бувають залізо - нікелеві, нікель-кадмієві, цинко - нікелеві й інші. Зарядні і розрядні характеристики залізо-нікелевих і нікель-кадмієвих акумуляторів наведені на рис. 3.11. Стрибок напруги на самому початку заряду цих акумуляторів (криві 9 і 10) підрозумівається поляризацією залізного електрода. Заряд виробляється нормальним зарядним струмом протягом 7 годин, при цьому до акумулятора підводиться кількість електрики, рівне 175% його номінальної ємності. При зарядному струмі, меншому номінального, крива напруги заряду проходить трохи нижче, а при більшому зарядному трохи вище кривих 9 і 10. Після заряду ЕРС акумулятора спочатку складає близько 1,5 В і потім установлюється 1,34-1,36 В.

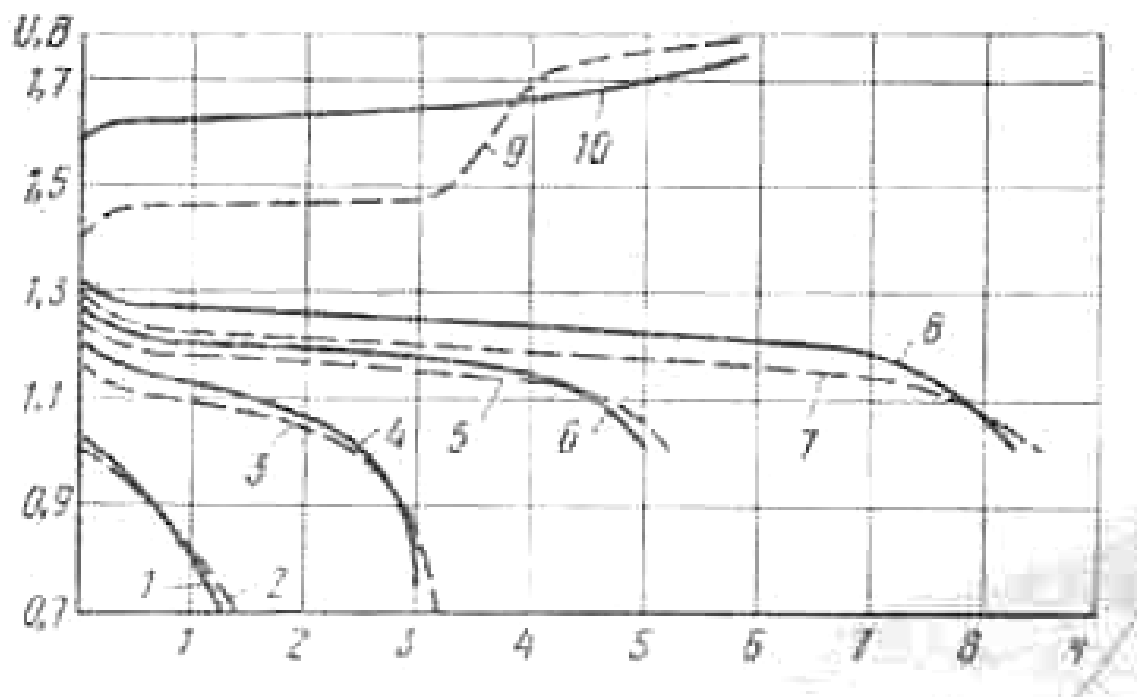


Рис. 3.11- Зарядні і розрядні характеристики залізо-нікелевих і нікель-кадмієвих акумуляторів

При розряді напруга на акумуляторі залежить від розрядного струму. Глибокий розряд акумуляторної батареї вимагає наступного посиленого заряду, щоб уникнути втрати ємності. Ємність акумуляторної батареї повинна бути достатньої для одержання необхідної потужності живлення всіх низьковольтних споживачів, що включаються на короткий час (електродвигунів привода дверей та ін.).

Конструкція лужних акумуляторних батарей. На тролейбусі ЗіУ-9 установлюють дві акумуляторні батареї 9НКЛБ-70, що включені послідовно і які мають загальну напругу 24 В і ємність 70 А·г. на тролейбусі 9Тр - акумуляторна батарея 18МКТ-105 напругою 24 В и ємністю 105 А·г.

Як приклад розглянемо конструкцію лужної акумуляторної батареї 9НКЛБ-70. Умовна позначка батареї розшифровується в такий спосіб: 9-число послідовне з'єднаних акумуляторів у батареї; НК - система акумуляторів (нікель-кадмієва); Л - конструкція електродів (ламельна); Б-призначення батареї (для роботи в буферному режимі); 70- номінальна ємність при 7-годинному розряді в А·г.

Лужний акумулятор складається з корпусу прямокутної форми, блоку позитивних і негативних пластин і електроліту. Корпус акумулятора може бути виконаний з листової сталі зварної конструкції або поліетиленовим. Блок пластин складається з пластин позитивної або негативної полярності, приварених до сталевих містків, що має вивідний борн. Пластина акумулятора виконана з окремих ламелей (пакетів), штампованих з листової перфорованої і нікельованої сталі, із запресованої в них активною масою і рамки, що з'єднує ламелі в пластину. Як активну масу позитивних пластин служить суміш гідрату окису нікелю з лускатим графітом  $\text{Ni}(\text{ВН})_3$ . Активна маса негативних пластин виконується із суміші губчатих кадмію і заліза. Позитивних пластин в акумуляторі на одну менше, ніж негативних. Для запобігання короткого замикання позитивні і негативні пластини розділені сепарацією з ебонітових стрижнів або скловолокна. Блок пластин акумулятора НКЛБ-70 щільно вставляють у сталеву обойму з ізоляційними прокладками по торцях, що виключає всяке їхнє переміщення, разом з обоймою поміщають у поліетиленову судину (корпус) і закривають кришкою. Борни позитивних і негативних пластин виводять через отвори кришок, ущільнюють гумовими й ебонітовими кільцями і закріплюють гайками. Середній отвір у кришці (горловина) служить для заливання електроліту в акумулятор, воно закривається пробкою, що має канал для виходу газів з акумулятора. На кришці нанесені знаки полярності "+" і "-".

У залізо-нікелевих акумуляторів на відміну від нікель-кадмієвих активна маса негативних пластин виконується з хімічно чистого губчатого заліза.

Електролітом для лужних акумуляторів служить водний розчин їдкого технічного калію марки А або В з добавкою їдкого літію акумуляторного (моногідрату гідроокису літію). При використанні електроліту без добавки моногідрату літію термін служби акумулятора скорочується і ємність акумулятора знижується приблизно на 20%.

Електроліт для лужних акумуляторів готують у чистих сталевих або пластмасових баках. Для готування електроліту придатна вода дистильована, дощова або питна, причому при використанні питної води її необхідно попередньо підлужити. Для цього в неї додають лугу з розрахунку 2-5 мл на літр води, після чого вода повинна відстоятися протягом доби. Баки повинні мати щільно закриваючі кришки. Особливо зручні баки з двома кранами: для зливу проясненого лугу й осаду, що зібрався внизу. Забороняється користуватися оцинкованим, лудженим, алюмінієвим, мідним, керамічним посудом, а також посудом, у якому підготовлявся електроліт для кислотних акумуляторів.

Рівень електроліту в акумуляторі повинний бути вище електродів на 5-25 мм. Заміряють його скляною трубкою з внутрішнім діаметром 3-5 мм по мітках на висоті до 25-30 мм.

Акумуляторну батарею підключають до зарядного агрегату, дотримуючи полярності, позитивний полюс джерела підключають до позитивного полюса акумуляторної батареї. Число, послідовно з'єднаних батарей, визначається напругою джерела струму з розрахунку 1,75-1,8 В на кожен послідовно з'єднаний акумулятор. Під час зарядки пробки акумуляторів відкривають (вентильні пробки можна не відкривати).

При експлуатації акумуляторної батареї необхідно стежити за тим, щоб поверхня акумулятора була чистою і сухою. Для очищення зовнішніх частин акумулятора від пилу і повзучих солей застосовують чисте, злегка вологе дрантя, намотане на дерев'яну паличку. Періодично прочищають отвори в пробках від повзучих солей, щоб гази могли вільно виходити з акумулятора. Міжелементні і вивідні з'єднання (перемички) у батареї повинні бути затягнуті, борни змазані технічним вазеліном для захисту від корозії. Змащення не повинне попадати на гумові ущільнення борнів, тому що гума може утратити свої пружні властивості.

Акумулятори зі сталевим корпусом встановлюють у гніздах шухляди з зазором не менш 3 мм, у протилежному випадку необхідно акумулятори ізолювати один від одного ебонітом, вініпластом або гумою. Стічні канавки шухляд, у яких розміщають акумулятори, необхідно періодично прочищати. Не рекомендується розряджати акумулятор нижче припустимої межі розрядки - щоб уникнути втрати ємності. Допускається розряд акумулятора до 1 В. Систематичний недозаряд лужних акумуляторів знижує їхню ємність. Одиначні перезаряди для лужних акумуляторів не представляють небезпеки, але постійний перезаряд зменшує термін їхньої служби.

#### *Контрольні запитання:*

- 1. Які переваги мають генератори змінного струму?*
- 2. У яких режимах працюють автомобільні акумулятори?*
- 3. Що уявляє собою струмошвидкісна характеристика генератора змінного струму?*
- 4. Яке призначення мають регулятори напруги? Як вони класифікуються?*
- 5. Які переваги мають контактно-транзисторні регулятори?*
- 6. Які характеристики мають інтегральні регулятори?*
- 7. Які характеристики має стартерний акумулятор?*
- 8. Які вимоги пред'являють до стартерних акумуляторних батарей?*



## 4. ОСОБЛИВОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Найбільш поширеними типами двигунів на рухомому складі міського електричного транспорту є двигуни постійного струму з послідовним та змішаним збудженням.

Рівняння руху рухомого складу має вигляд:

$$F_g = F - W - B, \quad (4.1)$$

де  $F_g$  – рівнодіюча сила, що прикладається до рухомого складу;

$F$  – сила тяги тягового електродвигуна;

$W$  – сила опору руху;

$B$  – гальмівна сила, що включає дію електричного гальма.

З усіх сил керованими є  $F$  та  $B$ . Зміна цих сил під час руху залежить від електромеханічних характеристик двигуна, який має різні системи збудження.

### 4.1. Електромеханічні характеристики двигунів послідовного збудження

У цих електродвигунів обмотка збудження підключається до мережі послідовно з якорем (рис. 4.1).

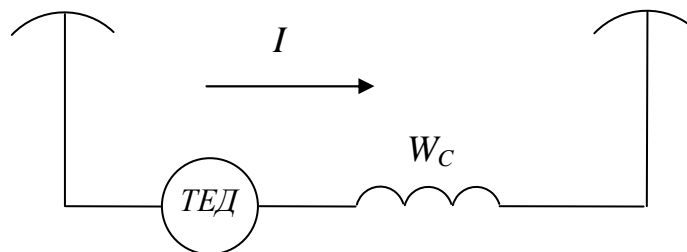


Рис. 4.1 –Схема включення ТЕД послідовного збудження

Магніторушійна сила у ТЕД послідовного збудження пропорційна струму якоря. При цьому залежність  $C\Phi = f(I)$  для такого двигуна близька за формою до залежності магнітного потоку  $\Phi$  від струму збудження, яка знімається при незалежному збудженні й відсутності навантаження.

Для побудови залежності  $C\Phi = f(I)$  використовуються навантажувальні характеристики  $\Phi = f(I_B)$ , зняті при різних струмах якоря. На кожній з кривих  $\Phi = f(I_B)$  відмічається координата, що відповідає струму збудження  $I_B$ , який дорівнює струму якоря  $I$ , для якого ця характеристика побудована. З'єднавши відмічені координати, можна отримати залежність  $C\Phi = f(I)$ . У даному разі це крива відповідатиме кривій, яка знімалась не на холостому ході, а при режимі навантаження зі струмом якоря  $I$ . На підставі цієї залежності можна побудувати

швидкісні характеристики двигуна послідовного збудження  $V = f(I)$  та електромагнітної сили  $F_{em} = f(I)$ .

Навантажувальна характеристика ТЕД послідовного збудження знімається при живленні обмотки збудження від додаткового джерела напруги при незмінному струмі якоря (див. рис. 4.2).

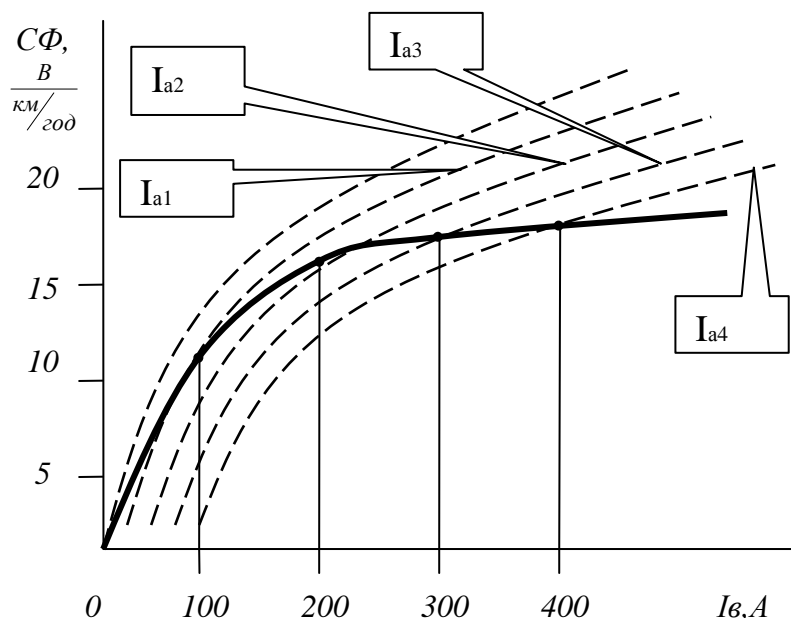


Рис. 4.2 – Навантажувальна характеристика  $C\Phi = f(I)$  ТЕД послідовного збудження

Запишемо вираз швидкісної характеристики у вигляді:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I r_a}{C_e \Phi}, \quad (4.2)$$

де  $U = const$  – напруга живлення;

$C_e = \frac{PN}{60a}$  – конструктивний коефіцієнт;

$N$  – кількість провідників якірної обмотки;

$p$  – кількість пар полюсів;

$a$  – кількість паралельних гілок якоря;

$\Phi$  – магнітний потік;

$I$  – струм якоря;

$R_a$  –  $\Sigma$  опір кола якоря.

Припустимо, що магнітна система машини не насичена і  $\Phi = k \times I$ , а  $R_a = 0$ . У цьому випадку вираз 1 матиме вигляд:

$$n = \frac{U}{C_e k I} = \frac{U}{k_1 I} = \frac{const}{I}, \quad (4.3)$$

де  $k_1 = C_e k$ .

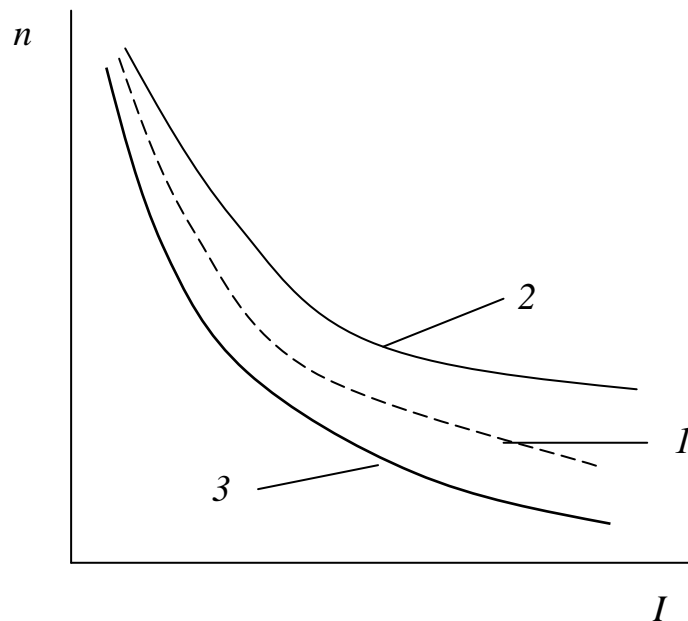


Рис. 4.3 – Швидкісна характеристика тягового електродвигуна послідовного збудження  $n=f(I)$

Таким чином при зроблених допущеннях залежність  $n=f(I)$  є гіперболою, побудованою в координатах  $n$  та  $I$  (крива 1) на рис. 3.3.

Тепер відкинемо припущення, що залежність  $\Phi = f(I)$  прямолінійна (рис.4.2). При цьому слід відмітити, що в області невеликих струмів характеристика 1 (рис. 4.3) не зміниться, а при роботі в зоні насичення зміна частоти обертання зменшиться, бо при цьому зменшиться зміна магнітного потоку. Цьому відповідає крива 2.

Відкинемо припущення, що  $R_a = 0$  і будемо враховувати член  $\frac{IR_a}{C_e \Phi}$  у формулі (4.2). Вираз  $\frac{R_a}{C_e} = const$ . При зростанні струму збільшуються насиченість магнітної системи і величина  $\frac{I}{\Phi}$ . При цьому відбуватиметься більш різке зменшення частоти обертання якоря, якому відповідатиме характеристика 3 на рис.4.3.

Електромеханічні характеристики ТЕД послідовного збудження зображені на рис. 4.4.

Електромагнітний момент ТЕД послідовного збудження при малих навантаженнях, коли магнітний потік прямо пропорційний струму, зростає від нуля в квадратичній залежності. При подальшому зростанні струму і в міру насичення машини крива  $M_E = f(I)$  відхиляється від квадратичної (параболічної) залежності й наближається до лінійної.  $M_E$  визначимо за формулою

$$M_E = C_m I \Phi \quad , \quad (4.4)$$

де  $C_m = \frac{PN}{2\pi a}$  - конструктивний коефіцієнт за моментом.

Характеристика обертаючого моменту на ободі колеса  $M=f(I)$  подібна характеристиці електромагнітного моменту, але її ордината менше на значення  $\Delta F$ , яка залежить від магнітних витрат двигуна та витрат в передачі. Тому крива  $M=f(I)$  не проходить через початок координат, а перетинає вісь абсцис при струмі  $I_x$ , який відповідає холостому струму машини. При такому малому струмі двигуна з послідовним збудженням з  $P > 1$  кВт працюють з недопустимо великими частотами обертання.

Характеристика ККД  $\eta = f(I)$  при малих навантаженнях наближається до нуля при струмі  $I_x$  й корисному моменті, рівному нулю. Ця координата відповідає холостому ходу, коли в основному вся підведена потужність розтрачується на покриття механічних витрат. При збільшенні навантаження ККД швидко зростає і коли механічні та електричні витрати зрівнюються, він має максимум. При подальшому збільшенні навантаження ККД знижується, бо зростають електричні витрати, пропорційні квадрату струму.

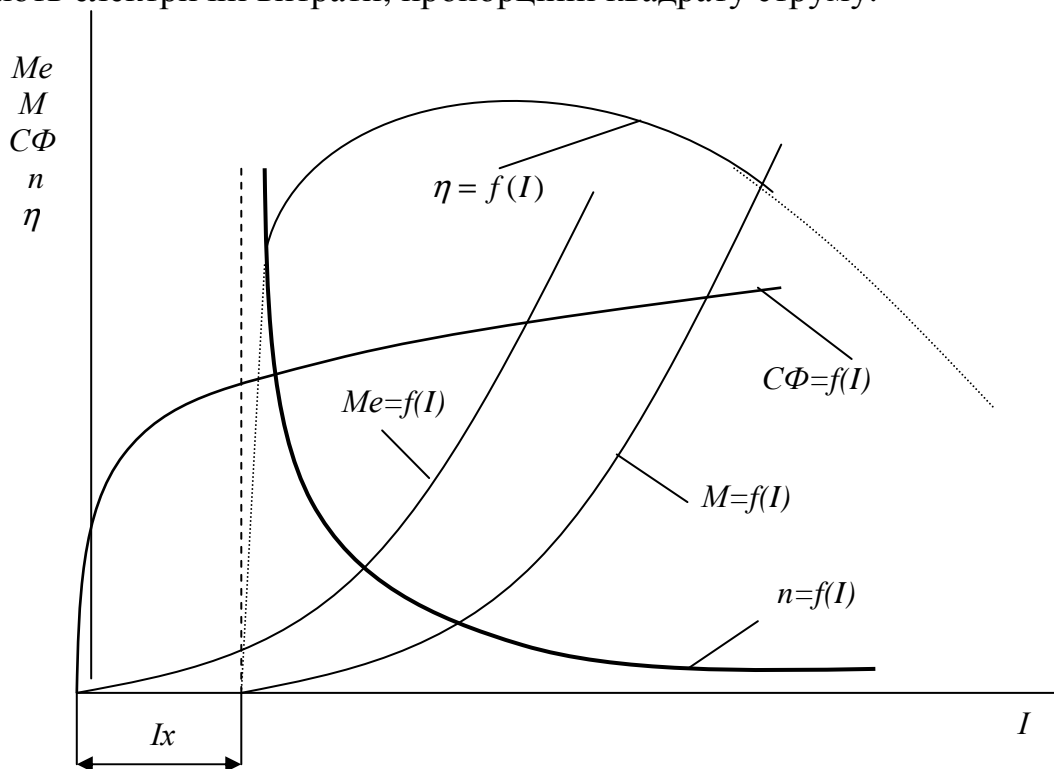


Рис. 4.4 - Електромеханічні характеристики ТЕД послідовного збудження

#### 4.2. Електромеханічні характеристики двигунів паралельного збудження

У цих електродвигунів паралельна обмотка збудження підключається до мережі через регульований реостат (рис. 4.5). Струм збудження пропорційний

напрузі, що прикладена до обмотки збудження. При цьому магніторушійна сила практично не залежить від струму якоря, але при збільшенні струму якоря вона зменшується за рахунок реакції якоря.

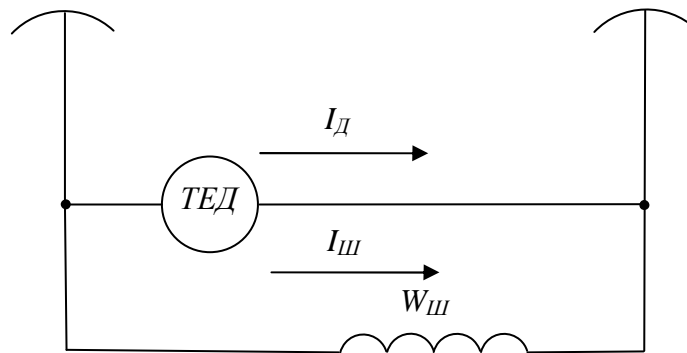


Рис. 4.5 –Схема включення ТЕД паралельного збудження

Електромеханічні характеристики двигунів паралельного збудження зображені на рис.4.6. Швидкісна характеристика "жорстка" і швидкість практично не залежить від навантаження. Із збільшенням навантаження швидкість зменшується за рахунок падіння напруги на активних опорах і розмагнічуючої дії реакції якоря.

Характеристика електромагнітної сили тяги  $F_{EM} = f(I)$  є прямою лінією, яка проходить через початок координат, тому що магнітний потік практично незмінний. Корисна сила тяги  $F$  відрізняється від  $F_{EM}$  на значення витрат  $\Delta F$  і виходять із струму холостого ходу.

Якщо прикласти до рухомого складу зовнішню силу, яка діятиме в тому ж напрямку, що відбувається рух, то швидкість рухомого складу  $V$  та ЕРС почнуть збільшуватись. При деякій швидкості  $V_0$  ЕРС буде дорівнювати  $U$ . Струм двигуна дорівнюватиме нулю. При подальшому збільшенні швидкості ЕРС стане більшою від прикладеної напруги і струм в двигуні зміниться на протилежний.

Оскільки напрямок магнітного потоку не зміниться, то сила тяги поміняє свій знак і буде спрямована проти руху і перетвориться на гальмівну силу. Тяговий двигун при цьому автоматично перейде в генераторний режим і буде віддавати енергію в тягову мережу. Такий режим називається рекуперативним гальмуванням. При цьому двигуни гальмують рухомий склад, повертаючи електричну енергію в живлячу мережу. За рахунок такого гальмування можна зменшити витрати енергії на тягу до 20%.

Швидкісна характеристика двигуна паралельного збудження в генераторному режимі розміщена в другому квадранті, а характеристика електромагнітної сили і сили тяги - в третьому квадранті і є продовженням характеристики при роботі машини в режимі двигуна.

Залежність ККД  $\eta = f(I)$  двигуна паралельного збудження в тяговому режимі має такий же вигляд, як і у двигуна послідовного збудження. У генераторному режимі ККД це відношення відданої електричної енергії до підведеної механічної потужності. Він дорівнює нулю при струмі якоря,

рівному струму паралельної обмотки і потім збільшується до максимуму при номінальних навантаженнях і далі зменшується за рахунок електричних витрат при струмах, що перевищують номінальний.

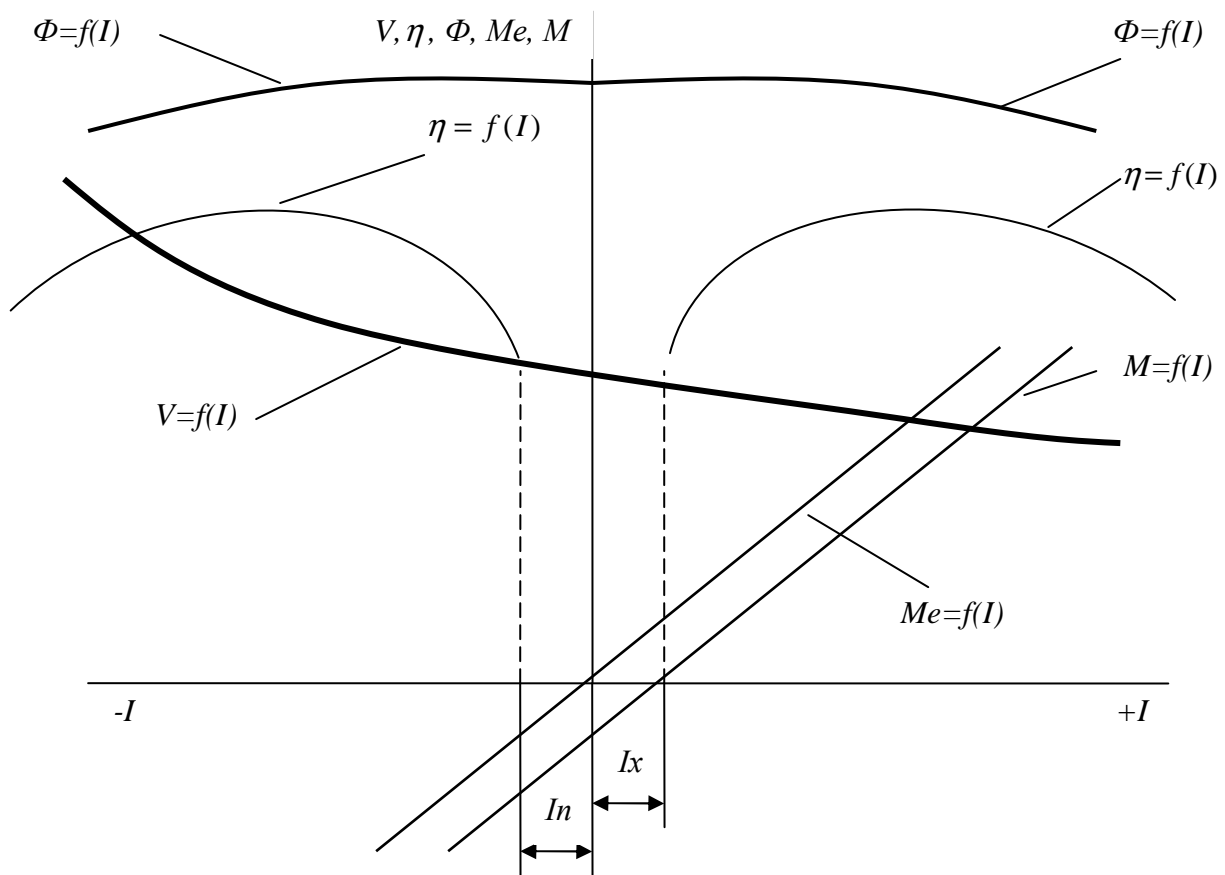


Рис. 4.6 - Електромеханічні характеристики ТЕД паралельного збудження

#### 4.3. Електромеханічні характеристики двигунів змішаного збудження

Двигуни змішаного збудження мають дві обмотки: послідовну і паралельну (рис. 4.7).

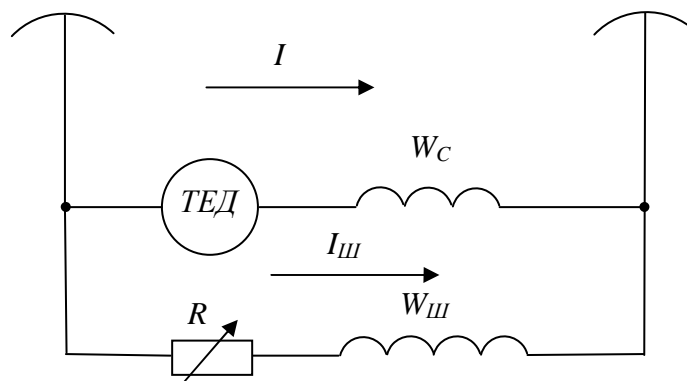


Рис. 4.7 – Схема включення ТЕД змішаного збудження

При їх згідному включенні магнітні потоки обох обмоток складаються, а їх сумарна магніторушійна сила визначається як

$$I_c \cdot \omega_c + I_{ш} \cdot \omega_{ш} = \omega_c \frac{I_{ш} \omega_{ш}}{\omega_c}, \quad (4.5)$$

де  $I_c$ ,  $\omega_c$  – струм і кількість витків якірної обмотки;

$I_{ш}$ ,  $\omega_{ш}$  – струм і кількість витків шунтової обмотки.

Якщо у виразі (4.5) позначити величину  $\frac{I_{ш} \omega_{ш}}{\omega_c} = I_0$ , то можна записати:  $\omega_c (I + I_0)$ .

Таким чином, двигун змішаного збудження можна подати як машину з однією серісною обмоткою, по якій тече струм якоря  $I$  і деякий додатковий струм  $I_0$ .

Електромеханічні характеристики двигунів змішаного збудження зображені на рис.4.8. Для цього двигуна залежність  $C\Phi = f(I)$  має такий же вигляд, як і у двигуна послідовного збудження з тією лише різницею, що вона зсунута від початку координат на струм  $I_0$ .

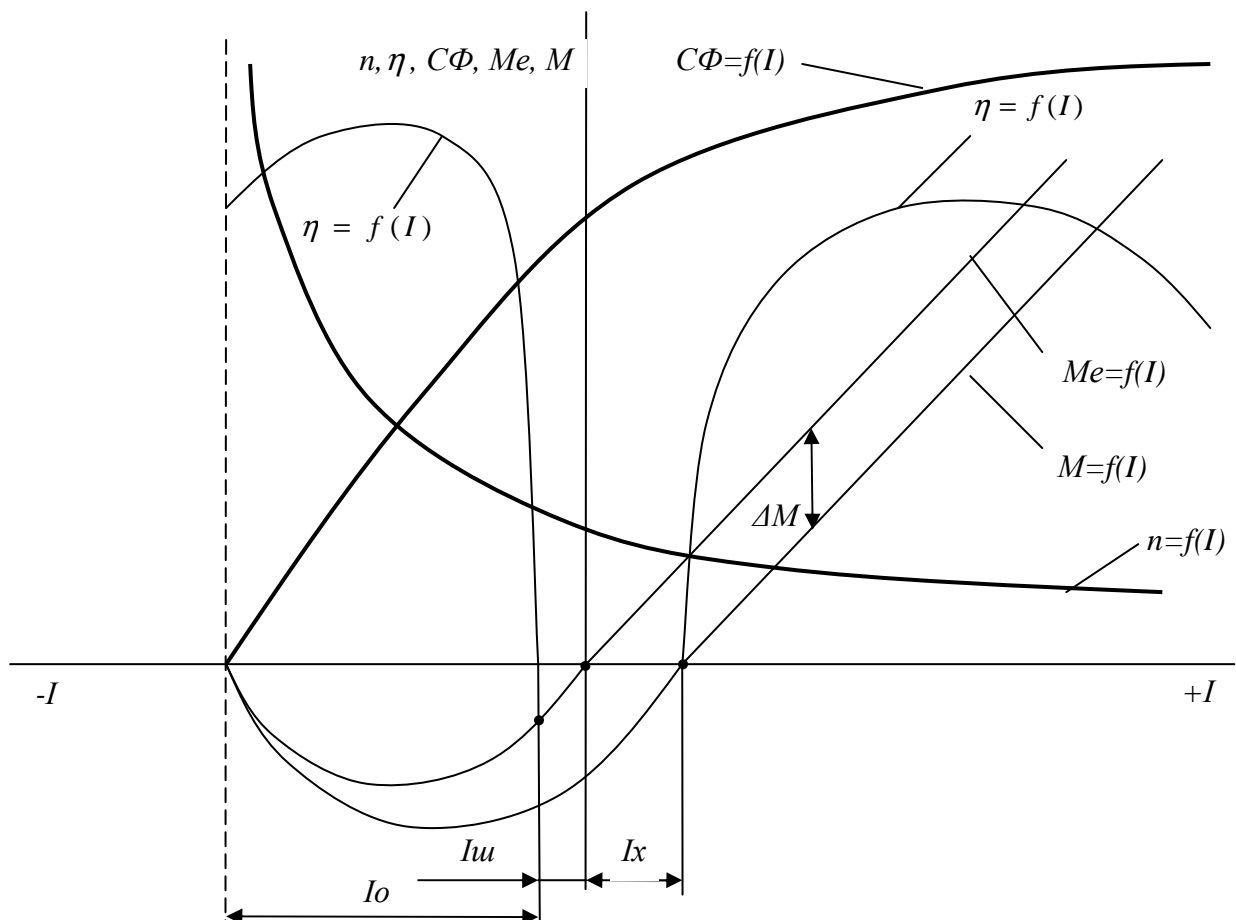


Рис. 4.8 - Електромеханічні характеристики двигунів змішаного збудження

Швидкісна характеристика має приблизно такий же вигляд, як у двигуна послідовного збудження, але зміщена вліво на величину струму  $I_0$ .

При струмі якоря, рівному нулю, в двигуні залишається магніторухійна сила паралельної обмотки  $\omega_{ш}$ . Цей факт забезпечує автоматичний перехід у генераторний режим. При цьому струм якоря змінює свій напрямок, а струм у паралельній обмотці проходить в тому же напрямку, що й до генераторного режиму. В режимі гальмування машина працює як генератор змішаного збудження зі зустрічно включеними обмотками. Тому з підвищенням гальмівного струму магнітний потік в машині буде зменшуватися, швидкість значно збільшиться і буде наближатися до нескінченності при струмі рекуперації  $I_0 = \frac{I_{ш} \omega_{ш}}{\omega_c}$ .

При переході в генераторний режим момент змінює свій напрямок і стає гальмівним для рухомого складу. У міру збільшення струму гальмування електромагнітний момент спочатку збільшується, а потім зменшується і при струмі, який дорівнює  $I_0 = \frac{I_{ш} \omega_{ш}}{\omega_c}$ , стає рівним нулю, тому що намагнічувальна сила також рівна нулю.

Корисний момент на валу машини при гальмівному режимі більший від електромагнітного на величину втрат. У двигуновому режимі, навпаки, - електромагнітний момент більший від корисного.

Характеристика ККД як в двигуновому, так і в генераторному режимах має такий же вигляд як і двигун послідовного збудження. ККД дорівнює нулю в двигуновому режимі при  $I = I_x$  при гальмівному режимі  $I = I_{ш}$ .

#### *Контрольні запитання:*

- 1. Які двигуни застосовують на рухомому складі електричного транспорту?*
- 2. Як знімається навантажувальна характеристика тягового електродвигуна постійного збудження?*
- 3. Що є електромеханічними характеристиками тягових двигунів?*
- 4. Які особливості мають двигуни змішаного збудження?*
- 5. Яку перевагу мають двигуни послідовного збудження в порівнянні з двигунами паралельного збудження?*
- 6. Яка характеристика для всіх типів ТЕД має однаковий вигляд?*



## 5. ЕЛЕКТРИЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ

### 5.1. Електричне гальмування ЕРС постійного струму з контакторно-реостатним керуванням

**Принцип електричного гальмування.** Одним з істотних переваг електричної тяги є можливість застосування електричного гальмування, заснованого на використанні зворотності електричних машин: кожна електрична машина може працювати в режимі генератора і двигуна. Властивість зворотності є найважливішою перевагою електричних машин перед іншими перетворювачами енергії. Гальмівна сила електричного гальмування має ту ж природу, що і сила тяги, але спрямована в бік, протилежний руху поїзда. Розходження в абсолютних значеннях сил тяги і електричного гальмування обумовлено лише різним впливом механічних і магнітних втрат у двигуні і втрат у передачі. У той час як при тяговому режимі ці втрати викликають зниження сили тяги в порівнянні з електромагнітною на величину  $\Delta F_K = 3,6(\Delta P_M + \Delta P_{MX} + \Delta P_3) / V$ , при генераторному режимі вони збільшують на таку ж величину гальмівну силу і сприяють гальмуванню поїзда. Тому гальмівна сила  $B_K$ , що розвивається однією тяговою машиною при будь-якій системі електричного гальмування, Н,

$$B_K = B_{\text{ЭМ}} + \Delta B_K = 3,6 \frac{P_{\text{ЭМ}}}{V} + \Delta B_K = 3,6 \cdot C \Phi I + 3,6 \frac{\Delta P_M + \Delta P_{MX} + \Delta P_3}{V}, \quad (5.1)$$

а гальмівна сила поїзда при  $n_d$  двигунах, Н,

$$B = n_d B_K = n_d (3,6 \cdot C \Phi I + \Delta B_K), \quad (5.2)$$

де  $\Delta B_K$  - збільшення гальмівної сили, викликане магнітними і механічними втратами в двигуні і передачі, що визначається формулою, аналогічною формулі для визначення втрат сили тяги, Н:

$$\Delta B_K = 3,6 \frac{\Delta P_M + \Delta P_{MX} + \Delta P_3}{V}. \quad (5.3)$$

Форма гальмівної характеристики  $B(V)$  залежить від системи електричного гальмування. На відміну від механічного гальмування тут відповідним вибором схеми включення тягових машин і параметрів цих схем можна одержати характеристики бажаної форми: *жорсткі* - для обмеження швидкості на спусках або *м'які* - для зупинки поїзда, коли потрібно підтримувати практично без змін гальмівну силу в широкому діапазоні

швидкостей.

*Застосування електричного гальмування* дає змогу одержувати економію витрат енергії на рух поїзда (у разі застосування рекуперативного гальмування) і підвищує надійність та безпеку експлуатації ЕРС з наступних причин:

1) при русі на ухилі електричне гальмування має механічно стійку характеристику, при якій будь-яке довільне підвищення швидкості супроводжується збільшенням гальмівного зусилля; цією властивістю не володіє механічне гальмування;

2) гальмування на затяжних ухилах не супроводжується досить небезпечним в експлуатації нагріванням гальмівних колодок і бандажів, що має місце при механічному гальмуванні;

3) імовірність заклинювання коліс при юзі у випадку електричного гальмування значно менше, ніж при механічному;

4) на ЕРС з'являється другий вид гальма, оскільки механічне гальмування зберігається у вигляді додаткових поїзних або резервних гальм.

*Основний недолік* електричного гальмування полягає в тому, що дія його поширюється тільки на колеса, що зв'язані з тяговими двигунами; це, природно, значно обмежує максимально можливу гальмівну силу. *Недоліком* електричного гальмування є також необхідність збільшення потужності тягових двигунів, які повинні працювати не тільки в тяговому, але й у гальмівному режимі, а також ускладнення пристроїв керування ЕРС.

*При двигунах послідовного збудження* для здійснення рекуперативного гальмування необхідні спеціальні збуджувальні агрегати, а для реостатного гальмування - збільшення потужності пускових реостатів.

Найбільше поширення одержало реостатне гальмування.

*Система електричного гальмування повинна задовольняти наступним основним вимогам:* мати електричну стійкість при всіх можливих експлуатаційних режимах і високій експлуатаційній надійності; стійкість по комутаційних, теплових і ізоляційних властивостях тягових машин; простоту і зручність керування для водія; забезпечувати рівномірний розподіл струму між паралельно включеними колами тягових генераторів при розбіжності їхніх характеристик; плавну і швидко появу гальмівної сили при установці контролера керування в гальмівне положення; необхідні гальмівні характеристики без перевищення припустимих меж для апаратів і устаткування.

### **. Реостатне гальмування**

*Основні рівняння.* При реостатному гальмуванні тягові машини, що працюють у генераторному режимі, включаються на гальмівний реостат (рис. 5.1) і їхня ЕРС врівноважується сумою падінь напруги в цьому реостаті і самих тягових машинах.

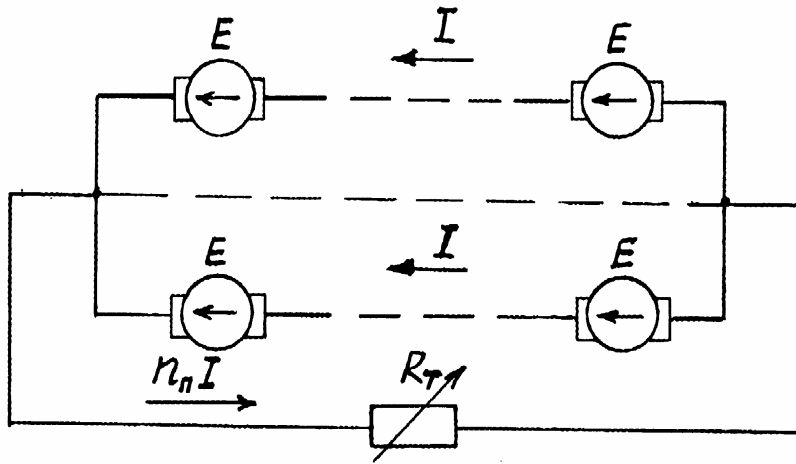


Рис. 5.1 - Схема включення тягових машин на загальний гальмівний реостат

Рівняння електричної рівноваги набуває при реостатному гальмуванні *однієї* машини наступний вигляд:

$$CV\Phi = (r + R'_T)I, \quad (5.4)$$

звідки

$$R'_T = \frac{CV\Phi}{I} - r, \quad (5.5)$$

де  $V$  - швидкість поїзда при реостатному гальмуванні,

$R'_T$  - опір гальмівного реостата, віднесений до одного тягового двигуна.

Якщо при реостатному гальмуванні  $n_c$  двигунів включено послідовно і  $n_{\parallel}$  - паралельно, то

$$n_c CV\Phi = n_c r I + n_{\parallel} R_T I$$

або

$$CV\Phi = \left(r + \frac{n_{\parallel}}{n_c} R_T\right) \cdot I, \quad (5.6)$$

де  $R_T$  - повний опір гальмівного реостата.

Зіставляючи вирази (5.4) і (5.6), одержимо

$$R'_T = \frac{n_{\parallel}}{n_c} R_T \quad (5.7)$$

або

$$R_T = \frac{n_c}{n_{\parallel}} R'_T. \quad (5.8)$$

З рівняння (5.6) одержуємо такі вирази для струму  $I$  двигуна і швидкості  $V$  при сталому режимі реостатного гальмування:

$$I = \frac{CV\Phi}{r + \frac{n_{\parallel}}{n_c} R_T}; \quad (5.9)$$

$$V = \frac{(r + \frac{n_{II}}{n_c} R_T) \cdot I}{C\Phi} . \quad (5.10)$$

Характеристики  $V(I)$  і  $B(I)$  реостатного гальмування залежать від схеми збудження тягових машин при генераторному режимі.

*Реостатне гальмування при послідовному збудженні тягових двигунів.* Реостатне гальмування з генератором послідовного збудження одержало широке застосування. На електричному рухомому складі (ЕРС) міського транспорту його застосовують на вагонах метрополітену і на багатьох типах трамвайних вагонів.

*Основною перевагою* цього виду гальмування є те, що воно здійснюється без додаткового джерела енергії для кола збудження. Крім того, режим гальмування не залежить від напруги в контактній мережі.

*Істотний недолік* такого гальмування полягає в значній тривалості й нестабільності процесу самозбудження генераторів. Час самозбудження залежить від швидкості, опору гальмівного реостата, ступені ослаблення збудження і залишкового магнітного потоку в машині.

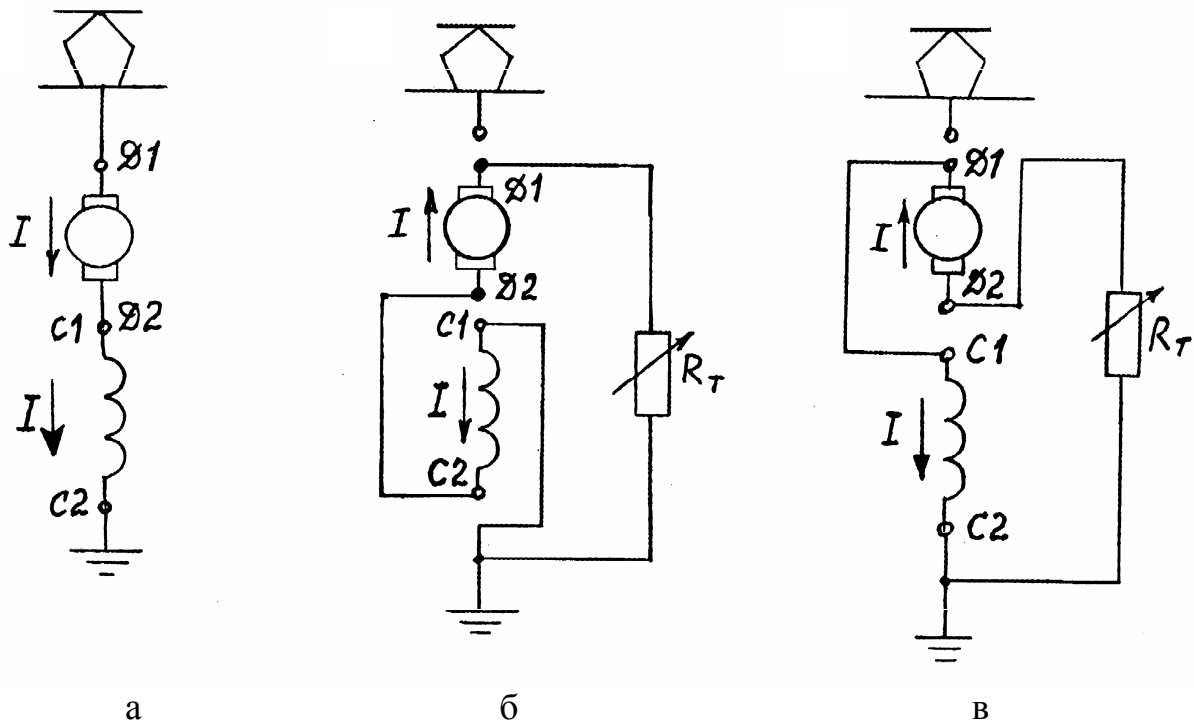


Рис. 5.2 - Схеми включення тягової машини: а) у режимі двигуна; б) генератора з переключенням виводів якоря; в) генератора з переключенням виводів обмотки збудження

*Процес самозбудження.* При реостатному гальмуванні тяговий двигун відключається від мережі і замикається на гальмівний реостат. Перехід двигуна в генераторний режим відбувається завдяки потоку залишкового магнетизму,

що зберігається в ньому. Для використання цього потоку необхідно, щоб при переході з двигунового режиму в генераторний при зміні напрямку струму якоря не змінювався напрямок МРС, а отже, і струм збудження. Тому при реостатному гальмуванні необхідно переключити або виводи Д1 і Д2 якоря (так позначаються виводи якоря в машинах постійного струму з розщепленою обмоткою додаткових полюсів), або виводи С1 і С2 послідовної обмотки збудження (рис.5.3, б, в).

Розглянемо перехідний процес самозбудження генератора, включеного на гальмівний реостат. У тяговому режимі машина працювала двигуном і була включена за схемою рис. 5.3, а. Зневажаючи впливом вихрових струмів і з огляду на те, що завдяки великій інерції поїзда швидкість його не встигає істотно змінитися за час перехідних процесів і може бути прийнята постійною ( $V=\text{const}$ ), запишемо рівняння перехідного процесу при  $R'_T=\text{const}$

$$CV\Phi = i(r + R'_T) + L \frac{di}{dt},$$

або

$$L \frac{di}{dt} = CV\Phi - (r + R'_T) \cdot i,$$

де  $L$  - індуктивність кола реостатного гальмування. Складові цих рівнянь представлені графічно у функції струму на рис. 5.4.

Залежність  $CV\Phi(i)$  представлена кривою 1, побудованою з урахуванням початкової ЕРС  $E_0 = CV\Phi_0$ , де  $\Phi_0$  - залишковий магнітний потік. Сумі падінь напруги  $(r + R'_T) \cdot i$  в генераторі і гальмівному реостаті відповідає пряма 2, що проходить через початок координат. ЕРС  $L \frac{di}{dt}$  показана на рис. 5.3 різницями ординат кривої 1 і прямої 2.

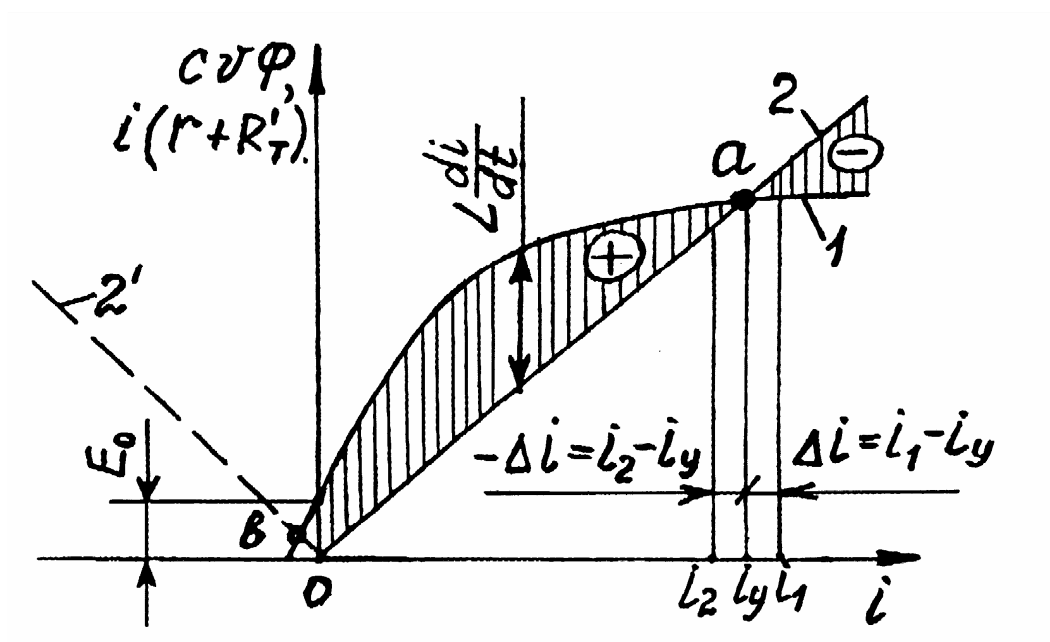


Рис. 5.3 - Процес самозбудження генератора при  $V=\text{const}$ ,  $R'_T=\text{const}$

Як видно з рис. 5.3, завдяки ЕРС  $E_0$  величина  $L \frac{di}{dt}$  в момент включення тягової машини на гальмівний реостат при струмі  $i=0$  позитивна, тобто струм починає зростати. У міру збільшення струму  $L \frac{di}{dt}$  спочатку зростає, а потім зменшується і при струмі, що відповідає точці **a** перетину кривої  $CV\Phi(i)$  і прямої  $(r+R'_T) \cdot i$ , стає рівна нулю. При цьому струмі закінчується перехідний процес і настає електрична рівновага: ЕРС генератора дорівнює падінню напруги в його силовому ланцюзі.

*Електрична рівновага у випадку струму, що відповідає точці **a**, є стійкою.* З рис. 5.4 видно, що при випадковому збільшенні струму реостатного гальмування ЕРС  $CV\Phi$  менше суми падінь напруги  $(r+R'_T) \cdot i$ ,  $L \frac{di}{dt}$  менше нуля і струм зменшується, тобто прагне до початкового значення. При випадковому зменшенні струму  $CV\Phi$  більше  $(r+R'_T) \cdot i$ ,  $L \frac{di}{dt} > 0$  і струм збільшується. Таким чином, забезпечена основна умова зовнішньої стійкості, яка полягає в тому, що знаки відхилення струму і похідної  $\frac{di}{dt}$  (а разом з нею і величини  $L \frac{di}{dt}$ ) повинні бути протилежними. У загальному вигляді ця умова може бути виражена нерівністю

$$\frac{d}{di} \left( L \frac{di}{dt} \right) < 0, \quad \text{або} \quad \frac{d}{di} [CV\Phi - (r+R'_T) \cdot i] < 0,$$

звідки

$$\frac{dCV\Phi}{di} < r + R'_T. \quad (5.11)$$

Отже, реостатне гальмування стійке тільки в тому випадку, якщо ЕРС  $CV\Phi$  зростає зі збільшенням струму в меншій мірі, ніж сума падінь напруги  $(r+R'_T) \cdot i$ . Як видно з рис. 5.3 умова дотримується при струмі, що відповідає точці **a**, що і визначає можливість стійкого реостатного гальмування.

Якби при переході з тягового режиму в гальмівний не були зроблені переключення, струм якоря протікав би в обмотці збудження в протилежному напрямку і лінію  $(r+R'_T) \cdot i$  на рис. 5.4 варто було б провести в другому квадранті. При цьому сталий струм був би мізерно малий (лінія 2' і точка **b**).

*Залежність процесу самозбудження від опору гальмівного реостата і швидкості.* Значення сталого струму реостатного гальмування залежить від опору гальмівного реостата  $R'_T$  і швидкості  $V$  [див. ф-лу (5.9)]. При даній швидкості  $V = \text{const}$  значення сталого струму  $i_y$  залежить від нахилу лінії  $(r+R'_T) \cdot i$  і він тим менше, чим більше опір  $R'_T$  (рис. 5.4, а). Отже, зі

збільшенням опору  $R'_T$  при  $V = \text{const}$  зменшується сталий струм реостатного гальмування і відповідно гальмівна сила. При деякому значенні опору  $R'_{T1} = R'_{\text{ТКР}}$  пряма  $(r + R'_T) \cdot i$  перетинає криву  $CV\Phi(i)$  у початковій її частині (точка 3) і самозбудження машини стає практично неможливим. Опір гальмівного реостата  $R'_{\text{ТКР}}$ , при якому неможливе самозбудження машини при даній швидкості  $V = \text{const}$ , називається критичним.

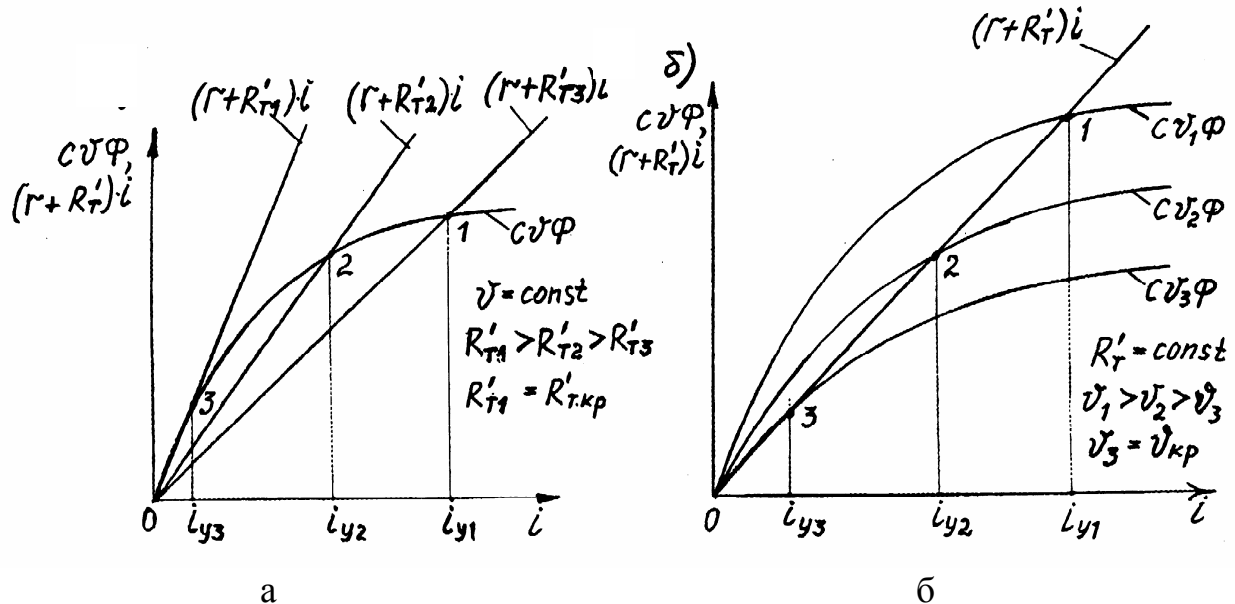


Рис. 5.4 - Залежність процесу самозбудження від опору гальмівного реостата (а) і від швидкості (б)

На рис. 5.4, б представлені криві  $CV\Phi(i)$  при різних значеннях швидкості  $V$  і тому самому значенні опору  $R'_T$  гальмівного реостата. Як видно, при  $R'_T = \text{const}$  зі зменшенням швидкості зменшується ЕРС і сталий струм, а отже, і гальмівна сила. При деякому значенні швидкості пряма  $(r + R'_T) \cdot i$  перетинає криву  $CV\Phi(i)$  у початковій її частині (точка 3), і самозбудження машини стає неможливим. Швидкість, при якій самозбудження машини при  $R'_T = \text{const}$  неможливе, називається критичною ( $V_{\text{кр}}$ ). Кожній ступені опору гальмівного реостата відповідає певне значення критичної швидкості. Чим більше опір гальмівного реостата, тим вище критична швидкість.

**Характеристики.** Гальмівну характеристику поїзда  $B(V)$  будують по кривих електромеханічних характеристиках  $V(I)$  і  $B_k(I)$  реостатного гальмування, які можна розрахувати виходячи з даного опору гальмівного реостата за формулами (5.10) і (5.2) і відомій залежності  $C\Phi(I)$ . Якщо ця залежність не задана, характеристики можна побудувати, користуючись залежністю  $V(I)$  для двигуна з обліком того, що  $C\Phi = (U - rI) / V_d$ , де  $V_d$  - швидкість тягового режиму, що відповідає напрузі  $U$  і струму  $I$ , для якого визначаються швидкість і гальмівна сила при реостатному гальмуванні. Підставляючи значення  $C\Phi$ , виражене через швидкість тягового режиму, у

формули (5.10) і (5.2), одержимо:

$$V = \frac{V_d \left( r + \frac{n_d}{n_c} R_T \right) \cdot I}{U - rI} ; \quad (5.12)$$

$$B = n_c n_d \left[ 3,6 \frac{U - rI}{V_d} \cdot I + \Delta B_K \right] . \quad (5.13)$$

Величину  $\Delta B_K$  розраховують за формулою (5.3), причому магнітні й механічні втрати повинні бути визначені по струму  $I$  і швидкості  $V$ , знайденої за формулою (5.12). Якщо немає даних про магнітні й механічні втрати, припустимо зневажити незначним розходженням у величинах  $\Delta B_K$  і  $\Delta F_K$ , викликаних тим, що при тих самих струмах якоря швидкості можуть бути неоднаковими. Тому величину  $\Delta B_K$  можна знайти приблизно по характеристиках  $F_{эм}$  ( $I$ ) і  $F_K$  ( $I$ ) як різницю  $\Delta F_K = F_{эм} - F_K$  при даному гальмівному струмі  $I$ . Тому що  $B_K = F_{эм} + \Delta B_K$ , то для побудови кривої  $B_K$  ( $I$ ) зручно відкладати вгору від кривої  $F_{эм}$  ( $I$ ) відрізки  $\Delta B_K \cong \Delta F_K$ , що представляють собою різницю величин  $F_{эм}$  і  $F_K$  (рис. 5.5). Характеристики уповільнюючих сил  $(B + W_0)(V)$  розраховують так само, як і при механічному гальмуванні, з тим лише розходженням, що основний опір рухові беруть щодо режиму руху під струмом.

З формули (5.10) видно, що при реостатному гальмуванні двигунів послідовного збудження найбільш ефективно регулювати швидкість зміною опору  $R_T$  гальмівного реостата. Чим більше цей опір, тим при даному струмі, а отже, і гальмівній силі повинна бути вище швидкість. Збільшення опору при будь-якій швидкості приводить до зниження струму і гальмівної сили. Можливо так само регулювання гальмівної сили і швидкості зміною магнітного потоку. Як впливає з формули (5.10), у разі зменшення збудження підвищується швидкість при даному струмі, а отже, і гальмівна сила і струм знижуються при незмінній швидкості. Розрахунок характеристик реостатного гальмування при регулюванні магнітного потоку можна вести за формулами (5.12) і (5.13), якщо виходити зі швидкісних характеристик тягового режиму при тій же, що й у режимі гальмування, зміні МРС і збудження  $\alpha$ . Де  $r_a$  - опір обмоток якоря і додаткових полюсів;  $r_b$  - опір обмотки збудження.

$$V_d = \frac{U - (r_a + \alpha r_b) \cdot I}{C\Phi} \quad (5.14)$$



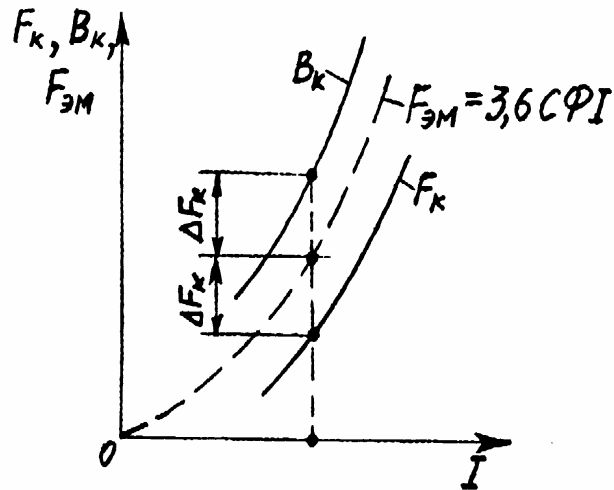


Рис. 5.5- Побудова кривої  $B_k(I)$

На рис. 5.6 наведені залежності  $V(I)$ , а на рис. 5.7 – гальмівні  $V(B)$  характеристики при різних опорах гальмівного реостата. Як видно з цих рисунків, при малих навантаженнях реостатному гальмуванню із самозбудженням властиві жорсткі характеристики, але зі збільшенням навантаження вони стають все більш м'якими. Це пояснюється тим, що швидкість при реостатному гальмуванні пропорційна відношенню  $I/\Phi$  [див. ф-лу (5.10)].

У випадку невеликих струмів і ненасиченій тяговій машині це відношення незмінне і отже практично є постійна швидкість  $V$ . З підвищенням навантаження в міру насичення машини відношення  $I/\Phi$  збільшується і відповідно зростає швидкість. При значному насиченні, коли припиняється зростання магнітного потоку, швидкість росте прямо пропорційно струму якоря і гальмівній силі. При цьому нахил лінії до осі абсцис тим більший, чим більше опір гальмівного реостата.

На рис. 5.6 і 5.7 показані також обмеження характеристик реостатного гальмування. Поряд з обмеженнями, загальними для тягового і гальмівного режимів - за максимально припустимим струмом  $I_{\max}$  двигуна (і відповідно до цього струму максимальній гальмівній силі  $B_{\max}$ ), зчепленням (величина  $B_{\max}$  не повинна перевищувати межі по зчепленню, а струм  $I_{\max}$ , обумовлений за характеристикою  $B(I)$ , не повинен перевищувати межі по комутації) і максимальній (конструкційній) швидкості  $V_{\max} = V_{\text{констр}}$ , при реостатному гальмуванні вводиться додаткове обмеження за максимально припустимою напругою  $U_{\max}$  тягового двигуна.

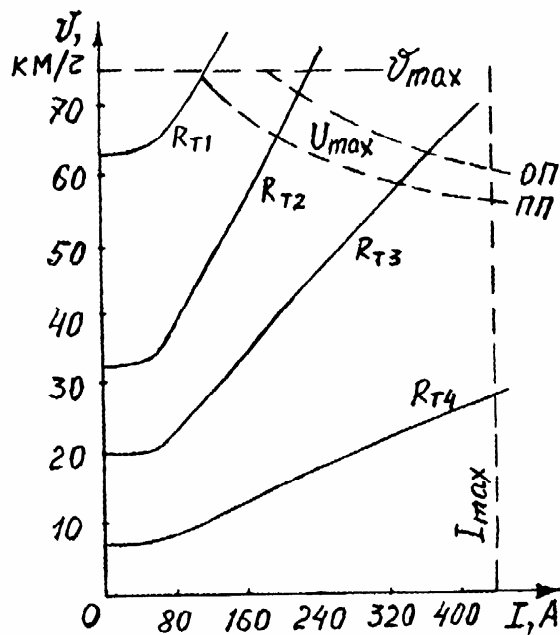


Рис. 5.6 - Характеристики  $V(I)$  реостатного гальмування і їх обмеження

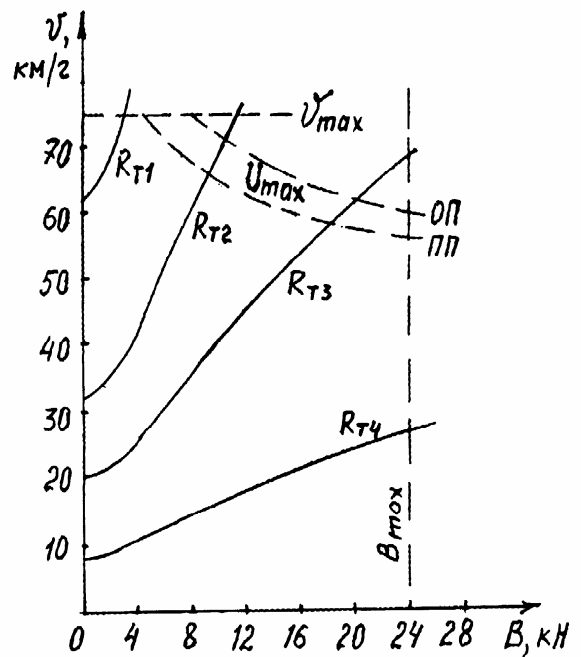


Рис. 5.7 - Характеристики  $V(B)$  реостатного гальмування і їх обмеження

Максимальна напруга двигуна в гальмівному режимі обмежується припустимою максимальною ЕРС між колекторними пластинами:

$$U_{\max} = \frac{e_{\max} \alpha_i}{1 + 0,45 \frac{N}{8apW_c \alpha}} \cdot \frac{K}{2p} = e_{cp} \cdot \frac{K}{2p}, \quad (5.15)$$

де  $e_{\max}$  і  $e_{cp}$  - максимальна і середня ЕРС між колекторними пластинами;

$\alpha_i = 0,6 \dots 0,65$  - коефіцієнт полюсного перекриття;

$K$  - число колекторних пластин;

$p$  - число пар головних полюсів;

$N$  - число активних провідників обмотки якоря;

$a$  - число пар рівнобіжних гілок обмотки якоря;

$W_c$  - число витків на один полюс обмотки послідовного збудження;

$\alpha$  - коефіцієнт регулювання збудження.

Небезпека надмірного підвищення напруги пов'язана з тим, що в режимі реостатного гальмування бажано реалізувати великі гальмівні сили при високих швидкостях руху. У цих умовах ЕРС двигуна велика, тому що він повинен

працювати при великих магнітних потоках і високих швидкостях; у *тяговому режимі великим магнітним потокам відповідають порівняно низькі швидкості*.

При даному струмі  $I$  найбільша припустима швидкість  $V_{\max}$  визначається з рівняння

$$U_{\max} = CV_{\max} \Phi - rI, \quad (5.16)$$

звідки

$$V_{\max} = (U_{\max} + r \cdot I) / (C\Phi). \quad (5.17)$$

Виражаючи СФ через швидкість  $V_d$  тягового режиму *при номінальній напрузі*  $U_{\text{ном}}$ , одержимо

$$V_{\max} = V_d \cdot \frac{U_{\max} + r \cdot I}{U_{\text{ном}} - r \cdot I}. \quad (5.18)$$

За цією формулою можна побудувати криву  $V_{\max}(I)$  обмеження гальмівного струму за максимальною напругою на колекторі двигуна. Для розрахунку  $V_{\max}$  варто взяти ряд значень струму  $I$  і за характеристикою  $V(I)$  тягового режиму при  $U_{\text{ном}}$  визначити відповідні значення  $V_d$ .

Оскільки падіння напруги у двигуні невелике в порівнянні з  $U_{\max}$  і  $U_{\text{ном}}$ , можна приблизно прийняти, що *при однакових струмах* максимальна швидкість реостатного гальмування в стільки разів більше швидкості тягового режиму, у скільки максимально допустима напруга  $U_{\max}$  більше номінального  $U_{\text{ном}}$ . Тому криві обмеження гальмування за допустимої напруги подібні швидкісним і тяговим характеристикам двигуна, але швидкості в  $U_{\max} / U_{\text{ном}}$  раз перевищують швидкості при тяговому режимі.

Швидкості двигунів послідовного збудження при навантаженнях, близьких до максимальних, приблизно в два рази менші найбільших, тому для ефективного використання реостатного гальмування варто було б застосовувати двигуни, які допускають у генераторному режимі дворазове підвищення напруги в порівнянні з номінальним. На такі умови в багатьох випадках розраховують тягові двигуни метрополітену і трамвая.

*Напругу на двигуні при реостатному гальмуванні можна знизити за рахунок ослаблення збудження. У цьому випадку  $U_{\max}$  зменшується* [див. ф-лу (5.15)]. Чим більше ступінь ослаблення поля (чим менше коефіцієнт регулювання збудження  $\alpha$ ), тим менше значення  $U_{\max}$ . Проте при ослабленні поля припустимі більші швидкості, обумовлені формулою

$$V_{\max} = V_{\text{д}} \cdot \frac{U_{\max} + (r_{\text{я}} + \alpha r_{\text{в}}) \cdot I}{U_{\text{ном}} - (r_{\text{я}} + \alpha r_{\text{в}}) \cdot I}, \quad (5.19)$$

Крива  $V_{\max}(I)$  зрушується вгору (див. рис. 5.6 і 5.7), тому що при цьому швидкість  $V_{\text{д}}$  росте, а  $U_{\max}$  зменшується в меншій мірі. Значення швидкості  $V_{\text{д}}$  тягового режиму, необхідні для визначення  $V_{\max}$  за формулою (5.19), варто визначати по відповідних швидкісних характеристиках при ослабленому збудженні. Однак необхідно враховувати, що зі зменшенням магнітного потоку погіршується комутація двигуна (знижується  $U_{\max}$ ) і для збереження гальмівної сили доводиться збільшувати струм якоря. Тому помітне збільшення діапазону реостатного гальмування можливо лише у випадку застосування спеціальних тягових двигунів з поліпшеною комутацією, розрахованих на роботу при глибокому ослабленні збудження.

У процесі реостатного гальмування двигунів послідовного збудження прагнуть, по можливості, використовувати ступені пускових реостатів і пускову електроапаратуру (реостатний контролер, реостатні контактори). Це вимагає ретельного узгодження пускових і гальмівних характеристик, додавання додаткових ступенів і підвищення загальної потужності реостатів, тому що вони працюють не тільки під час пуску, але і при гальмуванні.

Узгодження пускових і гальмівних характеристик зручніше виконати при їхній графічній побудові. Графічну побудову гальмівних характеристик  $V(I)$  при  $R_{\text{т}} = \text{const}$  виконують аналогічно побудові реостатних характеристик при пуску (рис. 5.8).

Приймаючи опори на пускових і гальмівних позиціях однаковими, графічну побудову гальмівних характеристик зводять до наступного. За рівнянням (5.10) або (5.12) будують прямолінійні характеристики  $V(R'_{\text{т}})$  для декількох значень струму  $I_{\text{і}} = \text{const}$  [при  $I_{\text{і}} = \text{const}$  залежність  $V(R'_{\text{т}})$  прямолінійна]. Потім через точки, що відповідають значенням гальмівних (пускових) опорів  $R'_{\text{ті}}$  на кожній позиції, проводять вертикальні прямі, точки перетину яких з похилими прямими  $V(R'_{\text{т}})$  при  $I_{\text{і}} = \text{const}$  зносять по горизонталі в правий квадрант із координатами  $V$  і  $I$ . Перетинання цих горизонталей з вертикалями, проведеними через точки, що відповідають струмам  $I_{\text{і}} = \text{const}$ , є точками характеристики  $V(I)$  при відповідному  $R'_{\text{ті}}$ .

При однакових струмах пускового і гальмівного режимів ( $I_{\text{п}} = I_{\text{т}}$ ) можна приблизно записати

$$R'_{\text{тmax}} \cong R'_{\text{пmax}} \cdot \frac{U_{\max}}{U_{\text{ном}}} \cong R'_{\text{пmax}} \cdot \frac{V_{\max}}{V_{\text{п}}}.$$

Оскільки для тягових двигунів послідовного збудження  $V_{\max}/V_{\text{п}} \approx 2$ , то максимальний опір гальмівного реостата повинен бути приблизно в два рази

більше максимального опору пускового реостата:  $R'_{T \max} \approx 2R'_{\Pi \max}$ .

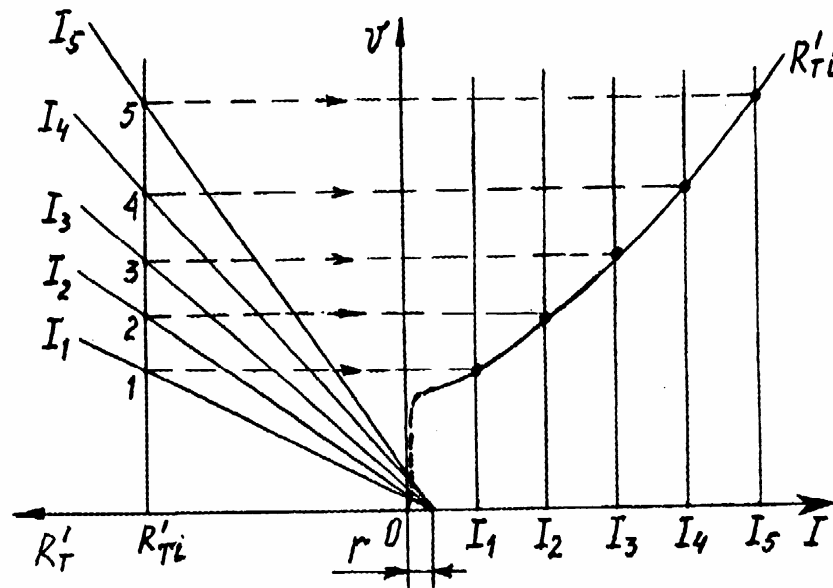


Рис. 5.8 - Графічна побудова характеристик реостатного гальмування

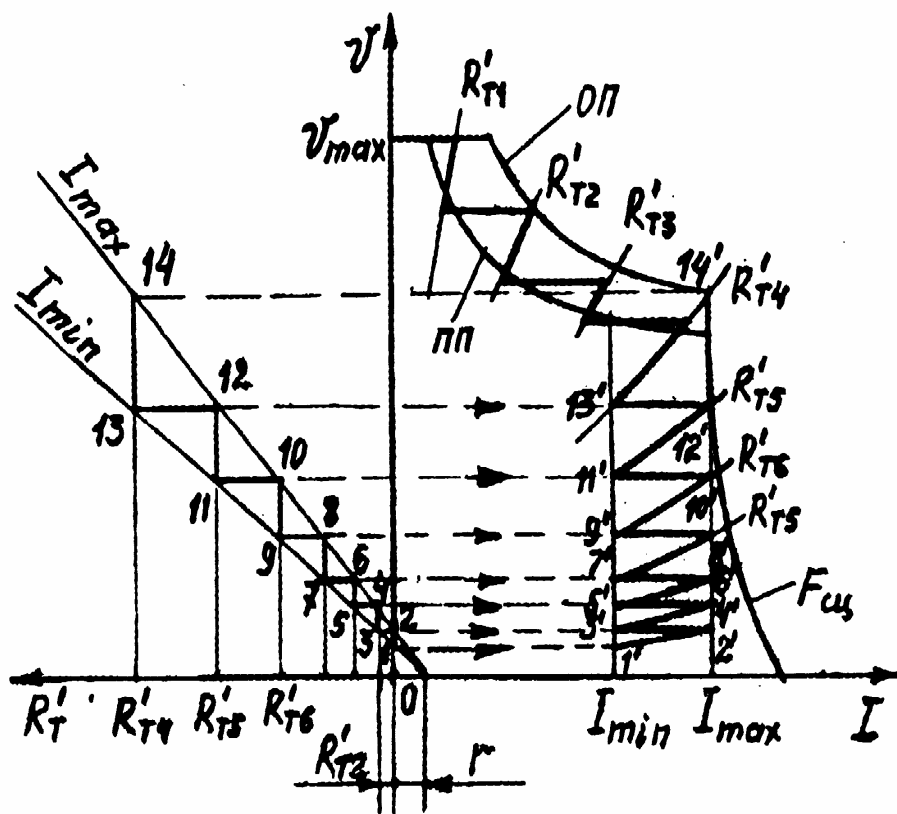
Енергія, яка виділяється в опорі гальмівного реостата (без урахування енергії, що витрачається на подолання опору руху поїзда на гальмівному шляху)  $A_{KT} = m(1 + \gamma)V_{\max}^2 / 2$ , а в опорі пускового реостата (без урахування енергії, що витрачається на подолання опору руху поїзда на пусковому шляху)  $A_{K\Pi} = m(1 + \gamma)K_{\Pi}V_{\Pi}^2 / 2$ . При  $K_{\Pi} = 1$  й  $V_{\max} / V_{\Pi} \approx 2$  одержуємо

$$A_{KT} = A_{K\Pi} \left( \frac{V_{\max}}{V_{\Pi}} \right)^2 \approx 4A_{K\Pi},$$

тобто енергія, яка виділяється в опорі гальмівного реостата, буде в 4 рази більше енергії, яка виділяється при пуску в пусковому реостаті, що потребує значного збільшення потужності гальмівного реостата в порівнянні з пусковим.

У випадку застосування реостатного гальмування для зупинки поїзда бажано підтримувати гальмівну силу, а отже, і гальмівний струм незмінними протягом усього періоду гальмування. При двигуні послідовного збудження для цього варто було б зменшувати гальмівний опір пропорційно зниженню швидкості, відповідно до формули (5.9):

$$r + \frac{n_{\Pi}}{n_c} \cdot R_T = V \cdot \frac{C\Phi}{I}. \quad (5.20)$$



Як і в режимі реостатного пуску, гальмівний опір виводиться не плавно, а окремими ступенями.

Принцип побудови гальмівної діаграми показаний на рис. 5.9. Процес гальмування так само, як і процес пуску, можна розділити на дві стадії.

У першій стадії гальмівний струм обмежений по максимальній напрузі на генераторі. В другій стадії гальмування проводиться приблизно при постійному середньому струмі. Побудову гальмівної діаграми зручніше починати з другої стадії. Межі коливань струму  $I_{\max}$  і  $I_{\min}$  визначають з тих же міркувань, що і межі пускових струмів, або по заданому середньому сталому уповільненню  $a_T$  і коефіцієнтові нерівномірності по струму  $K_1$ , або на підставі обмеження по зчепленню  $I_{\max}$  і по  $K_1$ , але з урахуванням додаткового обмеження по  $U_{\max}$ . Для  $I_{\max}$  й  $I_{\min}$  у лівій частині на рис. 5.9 по рівнянню (5.10) або (5.12) будують похилі прямі (промені), а в правій частині - вертикальні прямі. Між променями вписують ламану лінію. Її побудову зручно починати з мінімального гальмівного опору, в нашому випадку з  $R'_T = 0$  у такій послідовності: по осі  $V$  із точки 1 перетину осі  $V$  прямою  $V(R_T)$  при  $I_{\min}$  проводять вертикаль до перетину з прямою  $V(R_T)$  при  $I_{\max}$  в точці 2. З точки 2 проводять горизонталь до перетину прямої  $V(R_T)$  при  $I_{\min}$  і одержують точку 3. З точки 3 проводять

вертикаль до перетину з прямою  $V(R_T)$  при  $I_{\max}$  і одержують точку 4 і т.д.

У правій частині рис. 5.9 побудована гальмівна діаграма при зміні струму від  $I_{\min}$  до  $I_{\max}$  за умови, що процес зміни струму протікає миттєво, тобто без зміни швидкості за час перехідного процесу.

При побудові характеристик першої стадії гальмування опір першої позиції вибирають так, щоб при максимальній швидкості порожнього рухомого складу уповільнення не перевищувало  $0,4...0,5 м/с^2$ .

Між першою гальмівною характеристикою при  $R'_{T1}$  і характеристикою 13'-14' будують ряд проміжних характеристик. Вибирають ці характеристики з урахуванням системи керування і розташовують так, щоб збільшення уповільнення при переході з однієї позиції на іншу не перевищувало  $0,4 м/с^2$ . При автоматичному керуванні зміна величин уповільнення може здійснюватися різними методами, звичайно шляхом зміни уставки струму регулювання реле прискорення і уповільнення залежно від позиції реостатного контролера. Кількість позицій і установок реле вибирають так, щоб у процесі уповільнення струм не перевищував значень, обмежених кривою  $V_{\max}(I)$  при ослабленому полі (ОП).

Можна також здійснювати регулювання початкової стадії процесу уповільнення за допомогою *реле мінімальної напруги*. У цьому випадку характеристики розташовують приблизно так, як показано на рис. 5.10, тобто переключення з однієї характеристики на другу відбувається *при деякій постійній напрузі* на генераторі, наприклад, що відповідає кривій  $V_{\max}(I)$  при повному полі (ПП).

Гальмівна діаграма на рис. 5.10 побудована для одного тягового двигуна (генератора). Якщо ж у гальмівній схемі на загальний гальмівний опір працює кілька генераторів (рис. 5.2), то величину загального гальмівного опору розраховують за формулою (5.8).

*Попередній вибір ступіней гальмівних опорів за рис. 5.9* доцільно робити в тому випадку, коли вони не зв'язані з пусковими. Якщо ж при гальмуванні використовують пускові опори, то простіше побудувати пробні характеристики для ступенів пускового реостата і потім провести узгодження пускових і гальмівних опорів.

*За отриманими ступенями складають схему пускогальмівних опорів.* При цьому варто враховувати, що при великих уповільненнях можливо допускати на останніх гальмівних позиціях значно більші коливання гальмівного струму, ніж отримані по гальмівній діаграмі, внаслідок *збільшення* електромагнітної постійної часу колоа реостатного гальмування  $T = L / (R'_T + r - K)$ , де  $K$  - коефіцієнт нахилу кривій  $E(I_B)$ . Крім того, характеристики останніх позицій реостатного гальмування досить положисті. Тому в дійсності коливання гальмівного струму знижуються.

Після виведення останньої ступені гальмівного реостата в процесі подальшого зниження швидкості гальмівний струм і гальмівна сила різко зменшуються. Нарешті, при дуже малій швидкості, навіть якщо повністю

виведений реостат, практично зникає ЕРС двигуна, а разом з нею гальмівний струм і гальмівна сила. Тому, застосовуючи тільки реостатне гальмування, не можна зупинити поїзд або утримати його в нерухомому стані *на спусках з ухилами*, що створюють опір, який перевищує основний опір рухові. *На горизонтальних ділянках* за допомогою реостатного гальмування можна сповільнити потяг до повної зупинки, тому що при малих швидкостях, незважаючи на відсутність *ЕРС обертання*, струм і гальмівна сила підтримуються ще якийсь час завдяки ЕРС самоіндукції за рахунок накопиченої в двигуні електромагнітної енергії.

*Прискорення процесу самозбудження.* На початковій стадії процесу самозбудження генератора струм, а отже і гальмівна сила наростають досить повільно. Це обумовлено тим, що генератори мають малий залишковий магнітний потік, тобто малу залишкову ЕДС  $E_0$ , і велику індуктивність завдяки ненасиченій магнітній системі. Збільшення часу початкової стадії процесу самозбудження відбувається також унаслідок того, що при малих струмах виникають великі опори в щіткових контактах генераторів і можливе збільшення перехідних опорів у контактах електричних апаратів, а також вплив вихрових струмів в осердях головних полюсів і станині.

Поряд з нестабільністю при малих струмах опорів щіткових і перехідних контактів велику нестабільність має залишкова ЕРС  $E_0$ . Вона залежить від величини повітряного зазору, характеристик сталі, величини струму перед початком гальмування і ряду інших факторів. Досвід показує, що в сучасних тягових двигунах з великими повітряними зазорами залишковий магнітний потік і, отже,  $E_0$  настільки малі, що без додаткової підмагнічуючої обмотки їх самозбудження у режимі генератора відбувається тільки при високих значеннях швидкості.

Для прискорення і стабілізації процесу самозбудження, головним чином на першій стадії, можливі різні способи:

- 1) додаткове збудження за допомогою спеціальної підмагнічуючої обмотки, що живиться від контактної мережі або від акумуляторної батареї і має МРС порядку 8...15% від МРС основної обмотки при номінальному режимі;
- 2) додаткове живлення основної обмотки збудження від акумуляторної батареї або іншого джерела струму;
- 3) використання реостатного гальмування при невеликому струмі під час вибігу;
- 4) зменшення гальмівного опору або посилення поля на початку процесу самозбудження на короткий час, якщо гальмування починається при ослабленому полі.

На сучасному ЕРС міського транспорту найбільш розповсюджений перший спосіб. Третій спосіб застосовують на трамвайних вагонах типу «Татра», четвертий спосіб - тільки при тиристорному регулюванні, тому що він вимагає досить швидкодіючої і надійної системи відключення колоа, що форсує



самозбудження генератора.

При підмагнічуванні генераторів початкова ЕРС  $E_0$  визначається вже не потоком  $\Phi_0$ , а значно більшим потоком, який створюється додатковою МРС. Це показано на рис. 5.10, де штрихова крива 1 відповідає залежності  $CV\Phi(i)$  при самозбудженні, а крива 2 - тій же залежності при наявності додаткової МРС. Крива 2 подібна кривій 1, але зміщена вліво на струм  $I_{\text{доп}}$  підживлення або при додатковій обмотці збудження на струм підживлення, віднесений до числа витків основної обмотки збудження. Падіння напруги  $(r + R'_T) \cdot i$  в силовому ланцюзі зображується на рис. 5.10 прямою лінією 3, що проходить через початок координат. Як видно з рисунка, величина  $L \frac{di}{dt} = CV\Phi - (r + R'_T) \cdot i$  значно зростає при наявності підживлення, завдяки чому забезпечується швидке збудження тягових машин.

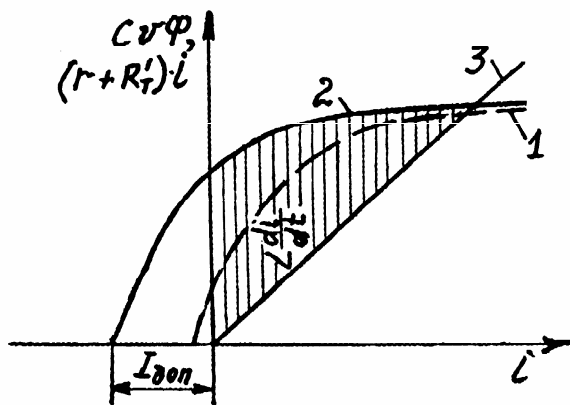


Рис. 5.10 - Прискорення процесу самозбудження за допомогою додаткової МРС

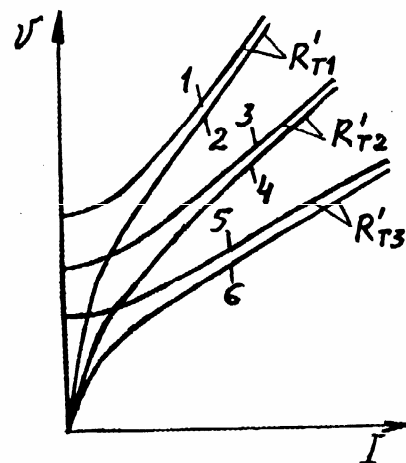


Рис. 5.11 - Гальмівні характеристики при самозбудженні генераторів з додатковим підмагнічуванням

Підживлення не тільки змінює умови збудження, але впливає також на характеристику електричного сталого режиму реостатного гальмування (рис. 5.11), зменшуючи її жорсткість, тому що тягова машина працює в цьому випадку при великих насиченнях, ніж у випадку самозбудження. Як видно з рис. 5.11, характеристики  $V(I)$  при підмагнічуванні виходять з початку координат, тобто гальмування забезпечується при всіх значеннях  $R'_T$  і  $V(R'_T > R'_{T2} > R'_{T3})$ . Підмагнічування змінює гальмівні характеристики головним чином при малих струмах, тобто в зоні ненасиченої магнітної системи генератора (криві 2, 4, 6).

Криві 1, 3, 5 побудовані при тих же опорах, але при відсутності підмагнічування. При великих гальмівних струмах характеристики практично збігаються.

## *Механічна стійкість при гальмуванні на спусках*

Як відомо, для механічної стійкості необхідно, щоб похідна за швидкістю діючої сили була менше похідної за швидкістю протидіючої сили (рис. 5.12). У даному випадку діючою силою є сила від ухилу  $W_i = mgw_i = mgi$ , що не залежить від швидкості, а протидіючою - сума сил гальмування й основного опору руху  $B_0 = B + W_0$ , тому умова механічної стійкості запишеться у вигляді

$$\frac{d(mgi)}{dV} < \frac{d(B + W_0)}{dV} \text{ або } \frac{d(B + W_0)}{dV} > 0,$$

тобто гальмівна характеристика реостатного гальмування стійка, якщо зі збільшенням швидкості гальмівна сила зростає. На рис. 5.12 точка перетину **a** залежностей  $(B + W_0)(V)$  і  $mgi(V)$  відповідає сталому режиму зі швидкістю  $V_y$ , тому що в ній  $B + W_0 = mgi$  і  $dV/dt = 0$ . При будь-якому зростанні швидкості від  $V_y$  сила від ухилу  $mgi < (B + W_0)$ , збільшення швидкості стає негативним, отже, потяг буде сповільнюватися, поки не досягне швидкості  $V_y$ . І навпаки, при будь-якому зменшенні швидкості від  $V_y$  сила від ухилу  $mgi > (B + W)$ ,  $dV/dt > 0$  і швидкість зростатиме до  $V_y$ .

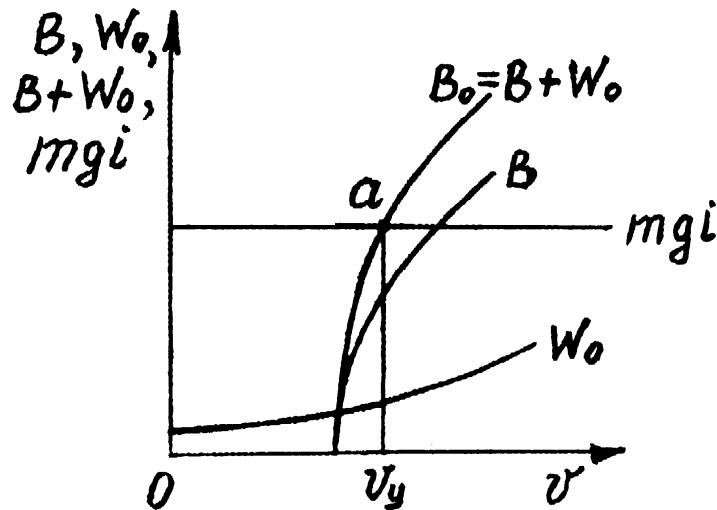


Рис. 5.12 - До визначення механічної стійкості характеристик реостатного гальмування

Таким чином, реостатне гальмування тягових двигунів послідовного збудження механічно стійке.

*Схеми з'єднання генераторів.* Схема електричного гальмування з двигуном послідовного збудження, замкнутим на гальмівний реостат (рис. 5.13, б, в), є електрично стійкою. У випадку установки на рухомому складі двох або чотирьох двигунів у режимі гальмування їх з'єднують паралельно або послідовно паралельно, тобто зберігають схему з'єднання двигунів, прийняту для нормальної роботи в тяговому режимі. Однак при рівнобіжному з'єднанні двигунів послідовного збудження доводиться вживати спеціальних заходів для забезпечення їхньої стійкої роботи і рівномірного розподілу навантаження між ними.

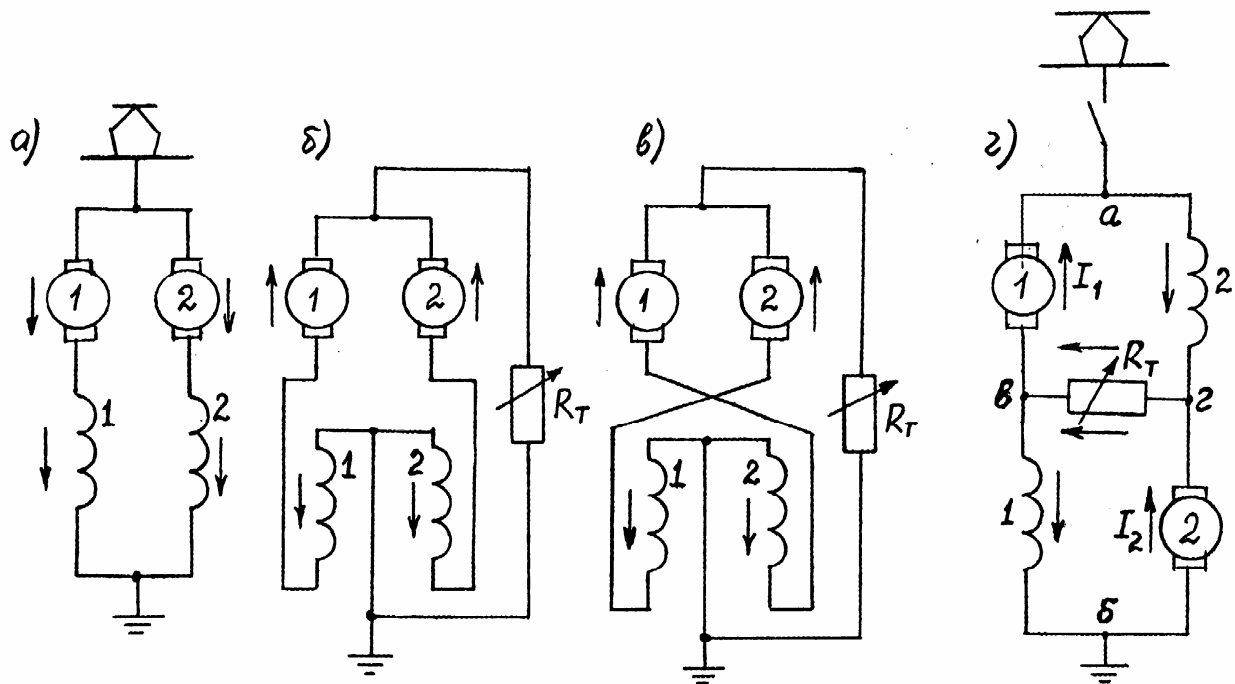


Рис. 5.13 - Схеми включення тягових двигунів послідовного збудження в режимі тяги (а) і в режимі реостатного гальмування (б, в, г)

У випадку паралельного включення двигунів (рис. 5.13, б) реостатне гальмування не стійке, тому що будь-яке випадкове збільшення струму одного з них, наприклад першого, збільшує його ЕРС, викликає появу зрівняльного струму, що ще більше навантажує цей двигун і розвантажує другий. Внаслідок цього ще більше збільшується ЕРС першої машини і зменшується ЕРС другої, що викликає подальше зростання зрівняльного струму. Це може зрештою призвести до короткого замикання першої машини на повністю розмагнічену другу, а потім до зміни напрямку струму і перемагнічуванню другої машини, тобто до короткого замикання двох послідовно з'єднаних машин, що працюють у генераторному режимі.

Найкращий розподіл навантажень між тяговими машинами і їхньою стійкою роботою забезпечує так звана *перехресна схема* (рис. 5.13, в), в якій обмотка збудження другого двигуна з'єднана послідовно з якорем першого, а його обмотка збудження - послідовно з якорем другого двигуна. Зростання

струму в обмотці якоря кожної з цих машин викликає збільшення магнітного потоку і ЕРС іншої машини, що забезпечує стійку роботу і гарний розподіл навантажень.

У перехресній схемі з діагональним включенням гальмівного реостата (рис. 5.13, г) не потрібно переключати обмотки якоря або збудження при переході на реостатне гальмування. Для переходу на гальмівний режим досить відключити тягові машини від контактної мережі (живлення двигунів у тяговому режимі здійснюється через точки а, б) і приєднати до точок в, м гальмівний реостат, через який піде сумарний струм обох двигунів. Недоліком перехресної схеми є припинення гальмування при обриві колоа хоча б одного з двигунів.

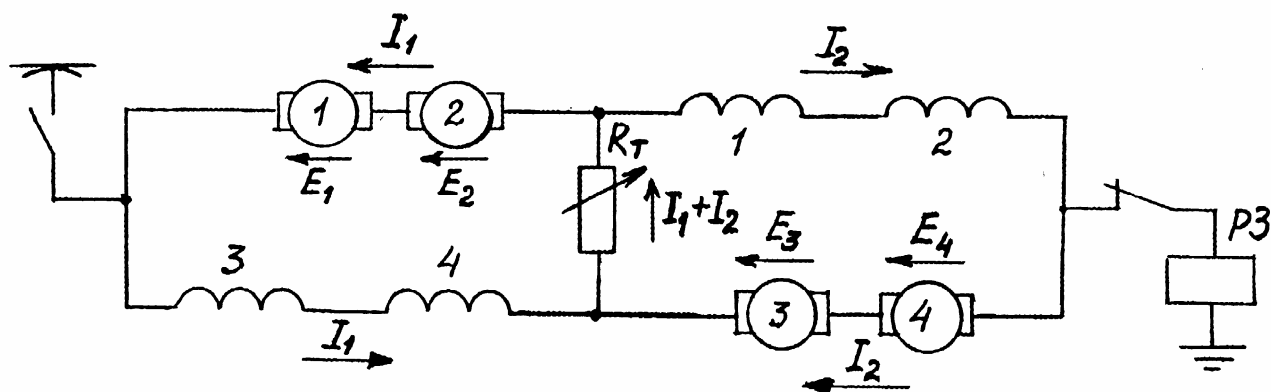


Рис. 5.14 - Схема реостатного гальмування вагонів метрополітену

На рис. 5.14 наведена перехресна схема реостатного гальмування чотирьох двигунів з діагональним включенням гальмівного реостата  $R_T$ , яка застосовується на вагонах метрополітену. Для зниження потенціалу стосовно землі схема заземлена через контакт гальмівного перемикача і реле заземлення РЗ.

Застосування схем з постійним послідовним включенням двох двигунів у режимі як тяги, так і реостатного гальмування, обумовлено відсутністю досить задовільних схем реостатного гальмування при чотирьох і більш рівнобіжних колах з'єднання двигунів. Використовують також схеми з роздільними гальмівними опорами, що працюють на різні групи двигунів.

### ***Реостатне гальмування при тягових машинах змішаного збудження***

При тягових машинах змішаного збудження, що у тяговому режимі працюють як двигуни згідно-змішаного збудження (рис. 5.15, а), принципово можливо чотири системи реостатного гальмування: живлення паралельної обмотки від мережі при зустрічному (рис. 5.15, б) або згідному (рис. 5.15, в) включенні паралельної і послідовної обмоток, самозбудження тягової машини також при зустрічному (рис. 5.15, г) або згідному (рис. 5.15, д) включенні

обмоток збудження.

У схемах із самозбудженням струм в обмотках паралельного збудження пропорційний падінню напруги  $R_T I$  у гальмівному реостаті, тобто струму якоря. Отже, при самозбудженні обох обмоток виходять такі ж характеристики, як у режимі реостатного гальмування машини послідовного збудження. Але регулювати швидкість і гальмівну силу тут значно трудніше, тому що при зменшенні опору гальмівного реостата різко знижується МРС паралельної обмотки, а разом з нею магнітний потік і гальмівна сила.

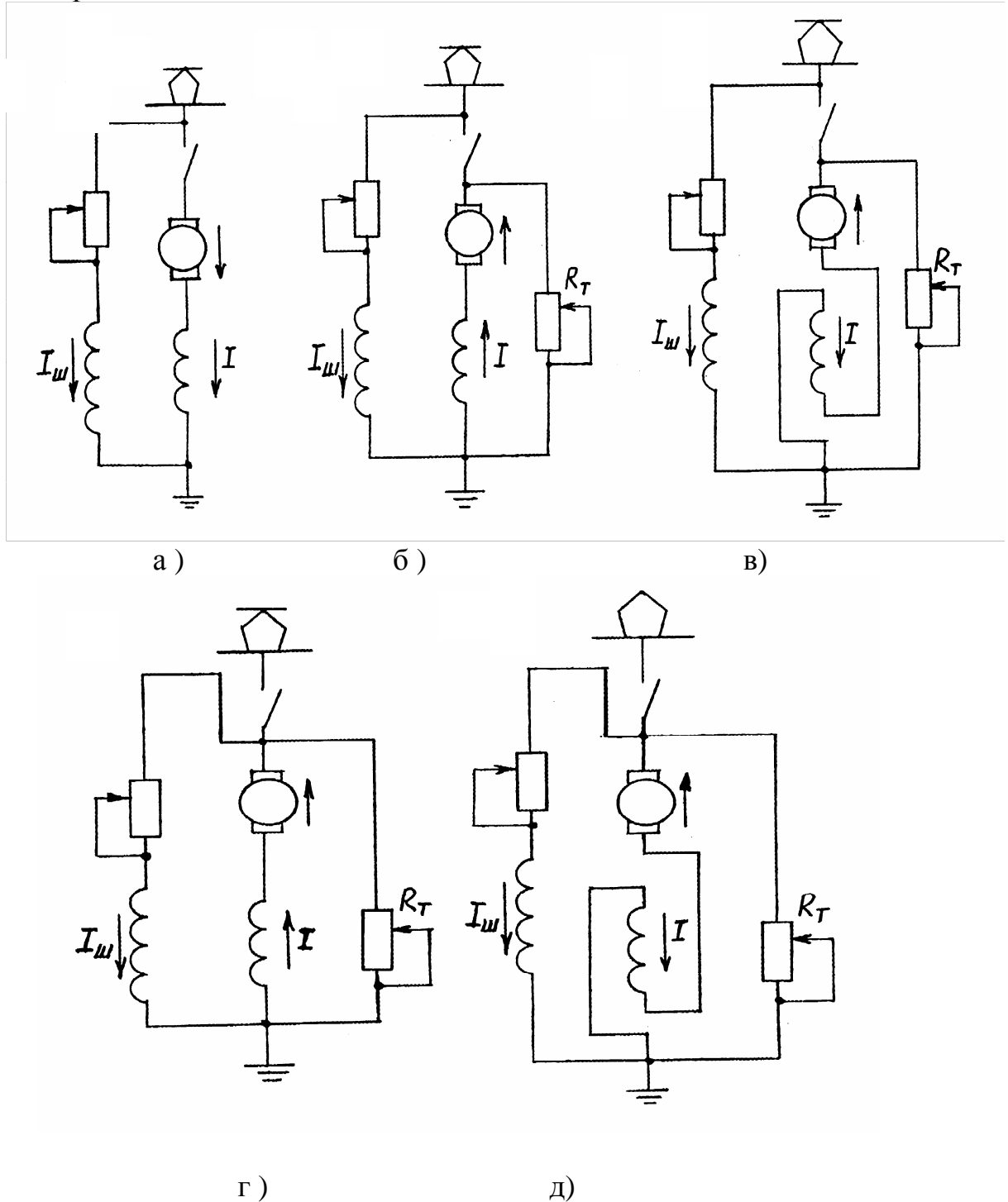


Рис. 5.15 - Схеми включення тягової машини змішаного збудження в режимі двигуна (а) і реостатного гальмування при живленні паралельної обмотки від

мережі (б, в) і при самозбудженні (г, д)

При великих опорах цього реостата збільшується МРС паралельної обмотки, внаслідок чого може надмірно підвищитися напруга. Крім того, через велику постійну часу паралельної обмотки сповільнюється самозбудження. Тому, незважаючи на бажаність самозбудження, що забезпечує незалежність гальмування від напруги контактної мережі, його варто визнати недоцільним для реостатного гальмування машин змішаного збудження.

При живленні паралельної обмотки від мережі і згідному включенні паралельної та послідовної обмоток (рис. 5.15, в) умови гальмування і характеристики будуть приблизно такими ж, як при машинах послідовного збудження з підживленням обмотки збудження або з додатковою обмоткою незалежного збудження. Однак більш сприятливі для реостатного гальмування умови створюються при зустрічно-змішаному збудженні з живленням паралельної обмотки від контактної мережі (рис. 5.15, б) або при незалежному її живленні. У цьому випадку забезпечується інтенсивне збудження при переході на гальмівний режим, стійка рівнобіжна робота тягових машин і досить рівномірний розподіл навантажень між ними, зручне регулювання процесу гальмування. Для переходу з тягового на гальмівний режим досить відключити якір двигуна від контактної мережі і замкнути його на гальмівний опір  $R_T$  (можна також спочатку підключати  $R_T$  до кола якоря, а потім відключати це коло від мережі). При цьому в порівнянні з тяговим режимом напрямок струму в обмотках якоря і послідовного збудження змінюється, в результаті чого виникає гальмівний режим, тому що магнітний потік зберігає колишній напрямок під дією МРС паралельної обмотки збудження.

Характеристики реостатного гальмування будують, як і тягові, при струмі в рівнобіжній обмотці  $I_{III} = \text{const}$ . При  $I_{III} = \text{const}$  і  $I = \text{const}$   $I / (C\Phi) = \text{const}$ , тому характеристики  $V(I)$  для  $R_T = \text{const}$  можна побудувати графоаналітичним методом (див. рис. 5.16). Коли потрібно побудувати одну або кілька характеристик  $V(I)$ , то зручніше користуватися аналітичним методом. У цьому випадку при попередньо обраних  $I_{III}$  і  $R_T$  можна задатися значенням струму якоря  $I$ , обчислити МРС збудження ТЕД

$$F_B = I_{III} W_{III} - I W_C \quad (5.21)$$

і за навантажувальними характеристиками  $\frac{E}{n}(F_B, I)$  або  $\frac{E}{\omega}(F_B, I)$  визначити

$$C\Phi = 5,3 \cdot \mu E / (n D_K) = \mu E / (1,8 \cdot \omega D_K) \quad . \quad \text{Далі за формулою} \quad \frac{I}{C\Phi} \cdot (R_T + r) = V$$

знаходять значення швидкості  $V$ . Для побудови однієї характеристики досить розрахувати 4-5 точок. Потім за розрахованим значенням  $C\Phi$  і  $V$  при заданому  $I$ , користуючись кривими магнітних і механічних втрат в двигуні і зубчатій передачі, обчислюють за формулою (5.1) гальмівну силу  $B_K$

$$(R_{T1} > R_{T2} > R_{T3}; I_{ш} > I'_{ш}).$$

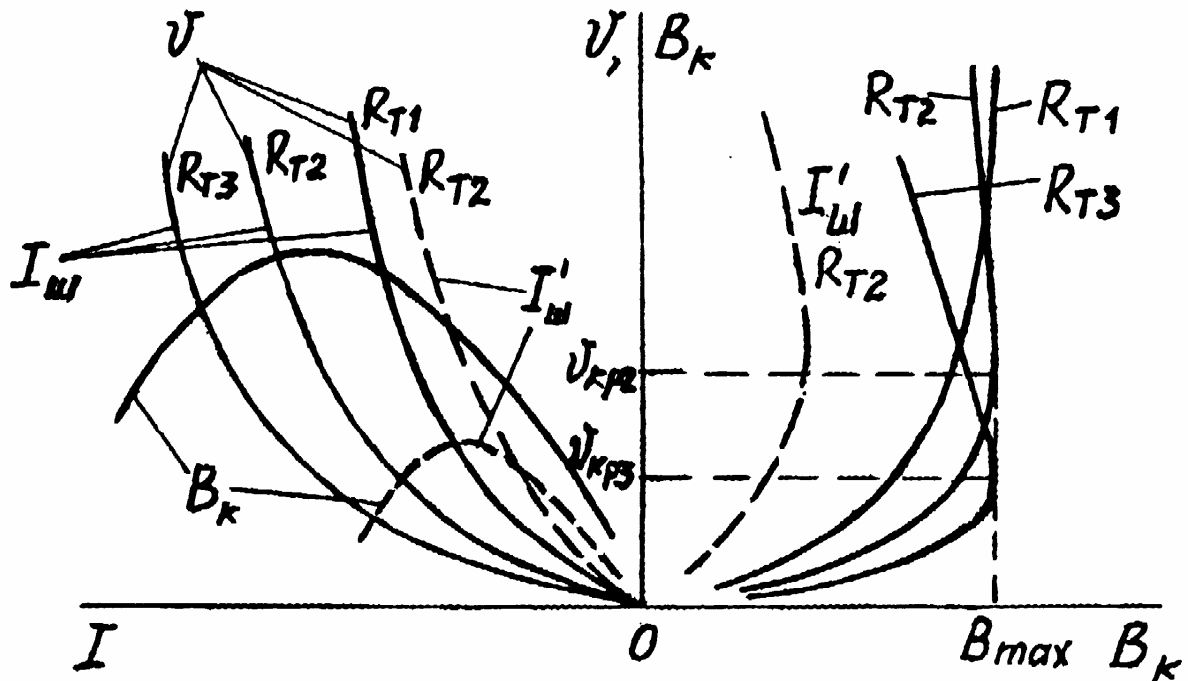


Рис. 5.16 - Характеристики реостатного гальмування тягової машини змішаного збудження при включенні за схемою рис. 5.15, б

Гальмівні характеристики показані на рис. 5.16 для трьох величин гальмівних опорів  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$ ,  $R_{T3}$  і двох значень струму  $I_{ш}$  й  $I'_{ш}$  у рівнобіжній обмотці. Гальмівна сила  $B_{эм}$ , що є основною складовою гальмівної сили  $B_K$ , пропорційна добуткові магнітного потоку на гальмівний струм, причому потік  $\Phi$  зменшується при збільшенні гальмівного струму. Тому характеристики  $B_K(I)$  мають максимум при деякому струмі  $I$  (рис. 5.16). Максимальне значення гальмівної сили  $B_{max}$  залежить від параметрів обмоток збудження  $W_{ш}$  й  $W_c$  і від значень струмів  $I_{ш}$  і  $I$ . При заданих значеннях  $W_{ш}$  і  $W_c$  сила  $B_{max}$  збільшується зі збільшенням  $I_{ш}$ . При досить великому числі витків  $W_c$  характеристики  $V(I)$  у широкому діапазоні швидкості мають велику похідну  $dV/dI$ . Це дає можливість використовувати на тролейбусах, обладнаних двигунами змішаного збудження, нерегульований опір  $R_T$  і для гальмування досить мати дві або три гальмівні характеристики при різних значеннях  $I_{ш}$ . Керування процесом гальмування при цьому здійснюється досить просто.

Для заданого двигуна (заданих  $W_{ш}$  і  $W_c$ ), гальмівні характеристики обумовлені значеннями  $I_{ш}$  і  $R_T$ . З характеристик  $V(B)$  для трьох значень  $R_T$ , показаних на рис. 5.16 суцільними лініями, найбільш незручною для гальмування з нерегульованим  $R_T$  є характеристика при  $R_{T1}$ , тому що вона забезпечує одержання максимальної гальмівної сили тільки при високих

швидкостях. Її недоцільно застосовувати навіть у тому випадку, коли за умовами гальмування немає необхідності в гальмівній силі, одержуваній при  $I_{\text{ш max}}$ . У цьому випадку доцільно зменшити  $I_{\text{ш}}$  і відповідно  $V_{\text{к max}}$ , щоб одержати зниження навантаження обмотки паралельного збудження і одержати більш зручну гальмівну характеристику.

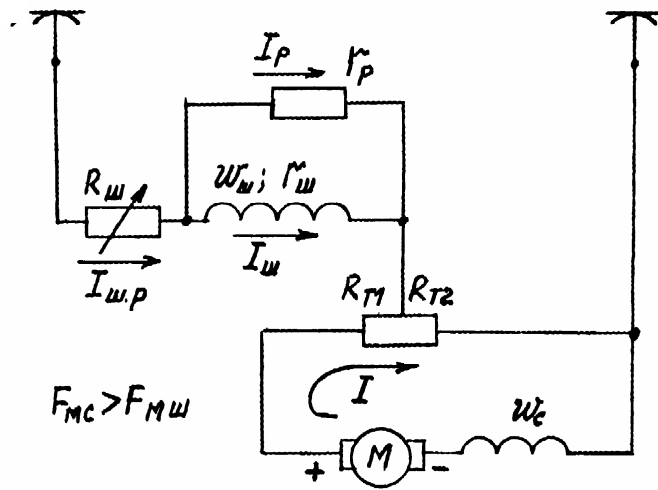
Характеристика при  $R_{\text{т3}}$  найкраща при гальмуванні при малих швидкостях, тому що має найменшу критичну швидкість  $V_{\text{кр.3}}$ , при якій виходить  $V_{\text{к max}}$ . Але при гальмуванні з високих швидкостей виникає велике струмове навантаження ТЕД і гальмівних опорів, а гальмівна сила значно знижується в порівнянні з її максимальним значенням.

Для високих швидкостей більш зручною є характеристика при  $R_{\text{т2}}$ , в якій в широкому діапазоні швидкості гальмівна сила зберігається практично постійною або зменшується незначно в порівнянні з її максимальним значенням.

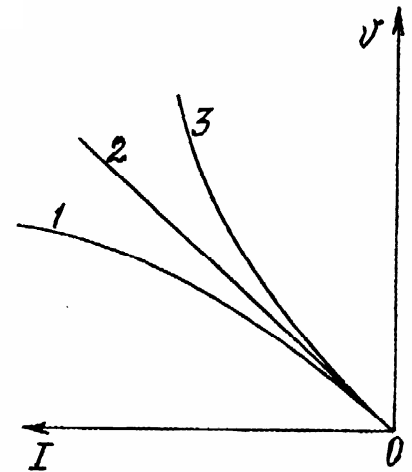
Перевагою схеми гальмування (див. рис. 5.15, б) при нерегульованому  $R_{\text{т}}$  є її простота. Однак обмотки збудження в генераторному режимі використовуються нерационально через зустрічний напрямок МРС. Через необхідність компенсації МРС послідовної обмотки збудження рівнобіжну обмотку перевантажують приблизно в 1,5-2 рази за струмом і відповідно в 3-4 рази за потужністю в порівнянні з тривалим режимом. Витрати енергії на збудження при цьому виходять значно більшими, ніж потрібно. При усуненні зустрічного напрямку МРС у генераторному режимі можна було б зменшити масу міді обмоток, а також зменшити габарити і масу тягових двигунів.

У схемі, зображеній на рис. 5.17, а, вказаний недолік усунутий. У ній при переході на реостатне гальмування реверсують обмотку якоря, а в коло обмотки паралельного збудження вводять частину гальмівного (стабілізуєчого) опору  $R_{\text{т2}}$ . *Основна складова МРС у цій схемі створюється обмоткою послідовного збудження, а за допомогою резистора  $R_{\text{т2}}$  гальмівним характеристикам  $V(I)$  надається необхідний кут нахилу, що забезпечує достатню постійність гальмівної сили при зміні швидкості. При невеликих і середніх гальмівних струмах МРС паралельної і послідовної обмоток складаються. При великому гальмівному струмі падіння напруги на  $R_{\text{т2}}$  більше напруги контактної мережі  $R_{\text{т2}} \cdot I > U$ ; тому струм у рівнобіжній обмотці збудження протікає в зворотному напрямку і її МРС віднімається з МРС послідовної обмотки.*





а)



б)

Рис. 5.17 - Схема реостатного гальмування (а) і характеристики при реверсуванні обмотки якоря і живленні обмотки паралельного збудження через частину гальмівного опору (б)

Для розрахунку струму в рівнобіжній обмотці можна написати наступні рівняння:

$$U = I_{шп} \cdot [R_{ш} + r_{ш}r_p / (r_{ш} + r_p) + R_{T2}] + IR_{T2} ; \quad (5.22)$$

$$I_{шп} = I_{ш} \cdot (r_{ш} + r_p) / r_p , \quad (5.23)$$

звідки

$$I_{ш} = \frac{U - IR_{T2}}{r_{ш} + (R_{ш} + R_{T2}) \cdot (r_{ш} + r_p) / r_p} = I_{ш0} - \lambda I , \quad (5.24)$$

де  $I_{ш0}$  - струм у рівнобіжній обмотці при  $I = 0$ :

$$I_{ш0} = \frac{U}{r_{ш} + (R_{ш} + R_{T2}) \cdot (r_{ш} + r_p) / r_p} ; \quad (5.25)$$

$\lambda$  - деякий безрозмірний коефіцієнт:

$$\lambda = \frac{R_{T2}}{r_{ш} + (R_{ш} + R_{T2}) \cdot (r_{ш} + r_p) / r_p} . \quad (5.26)$$

Для побудови характеристик можна використовувати рівняння (5.1), а також рівняння (5.10) і (5.21):

$$V = \frac{I}{C\Phi} \cdot (R_{T1} + R_{T2} + r) ; \quad (5.27)$$

$$F_B = I_{ш0} W_{ш} - (\lambda W_{ш} - W_C) \cdot I . \quad (5.28)$$

Ці рівняння показують, що при відповідному підборі параметрів схеми можна одержати гальмівні характеристики різної форми (рис. 5.17, б): при  $\lambda W_{ш} = W_C$  - характеристики незалежного збудження (пряма 2); при  $\lambda W_{ш} < W_C$  - характеристики послідовного збудження з підмагнічуванням (крива 1); при  $\lambda W_{ш} > W_C$  - характеристики з зустрічно-змішаним збудженням (крива 3).

Згідно з (5.24), струм  $I_{ш}$  в рівнобіжній обмотці для схеми (див. рис. 5.18, а) зменшується залежно від гальмівного струму  $I$  за прямолінійним законом і при деякому значенні струму  $I$  стає рівним нулю, а потім приймає негативне значення, тобто струм по обмотці паралельного збудження тече в контактну мережу. Потужність, затрачувана на збудження обмоток у схемі на рис. 5.18, а, виходить істотно меншою, ніж у схемі на рис. 5.15, б. Схема на рис. 5.18, а має ще й ту перевагу, що при зникненні напруги в контактній мережі гальмівна сила не пропаде, тому що в цьому випадку генератор працює на самозбудженні.

Однак для схеми на рис. 5.17, а потрібний реверсор з непрямым приводом, розрахований на велике число переключень, тому що кожний раз при переході на реостатне гальмування повинно відбуватися реверсування обмотки якоря. Крім того, виходить більш складна схема керування. Тому більше поширення одержала схема реостатного гальмування, яка представлена на рис. 5.14. Ця схема відрізняється тим, що обмотка послідовного збудження відключена при гальмуванні. Тут не потрібно реверсування обмотки якоря і схема спрощується. У цій схемі виходить достатнє розвантаження обмотки паралельного збудження при відносно простому способі переходу на гальмівний режим. Вона дозволяє одержувати гальмівні характеристики, подібні до характеристик, що зображені на рис. 5.17.

Усі три схеми (див. рис. 5.15,б; 5.17,а; 5.18) дають можливість використовувати рекуперативне гальмування для зниження швидкості й гальмування на спусках при спільній дії двох обмоток збудження.

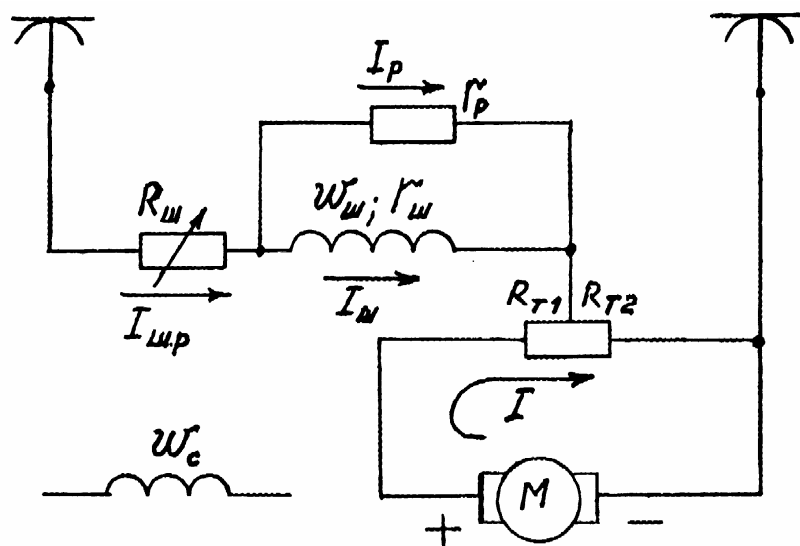


Рис. 5.18 - Схема реостатного гальмування при виключеній послідовній обмотці

Коли на рухомому складі з ТЕД змішаного збудження не передбачається використання рекуперативного гальмування, доцільно виконувати ТЕД із МРС обмотки послідовного збудження, що переважає над МРС обмотки паралельного збудження. Так виконані тягові двигуни типів ДК-207 Г и ДК-210 АЗ для тролейбусів типів ЗіУ-5Д і ЗіУ-9, а також ДК-259Г2 для трамвайних вагонів типу КТМ -5МЗ. У тяговому режимі працюють обидві обмотки, а при реостатному гальмуванні (див. рис. 5.18) - тільки обмотка паралельного збудження.

На рис. 5.19 подана схема реостатного гальмування з одним двигуном змішаного збудження з перевагою МРС послідовної обмотки. У цій схемі при гальмуванні послідовна обмотка не відключається і по ній протікає струм паралельної обмотки. МРС паралельної і послідовної обмоток збудження складаються, однак МРС послідовної обмотки невелика і її вплив на загальну МРС несуттєвий. Гальмування здійснюється при незмінному опорі в гальмівному контурі, тому ефективне гальмування забезпечується до швидкості  $V=16...12$  км/г. При досягненні цієї швидкості в дію вводиться механічне гальмо. При підгальмовуванні рухомого складу зменшується струм паралельної обмотки за рахунок включення додаткового опору.

Особливістю схем гальмування рухомого складу, що має чотири двигуни змішаного збудження (рис. 5.20) з перевагою МРС послідовної обмотки, є наявність двох незалежних контурів, що включають стабілізуючі опори. З метою зниження швидкості закінчення дії електродинамічного гальма трамвайних вагонів до 3...5 км/г гальмівний опір у цих схемах виконують регульованим.

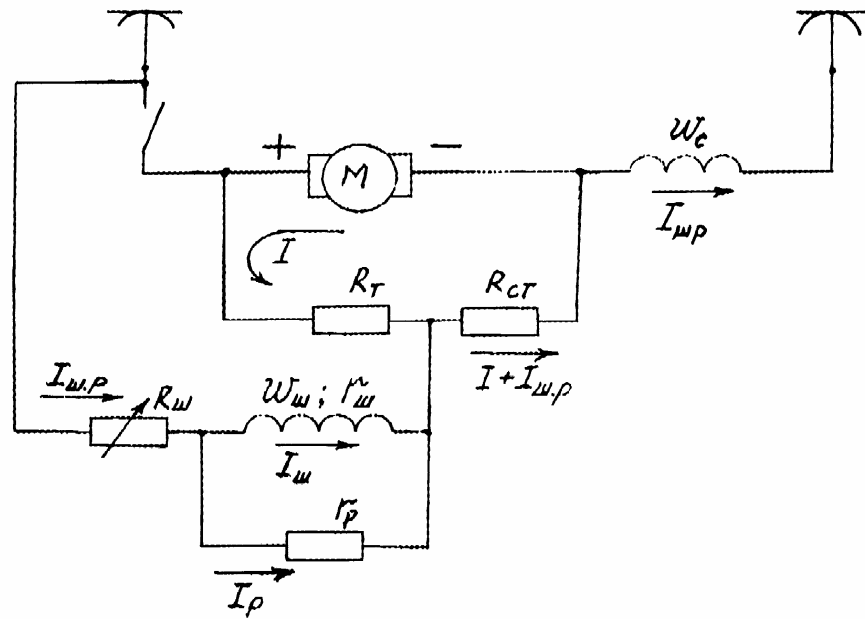


Рис. 5.19 - Схема реостатного гальмування з двигуном змішаного збудження з перевагою МДС послідовної обмотки

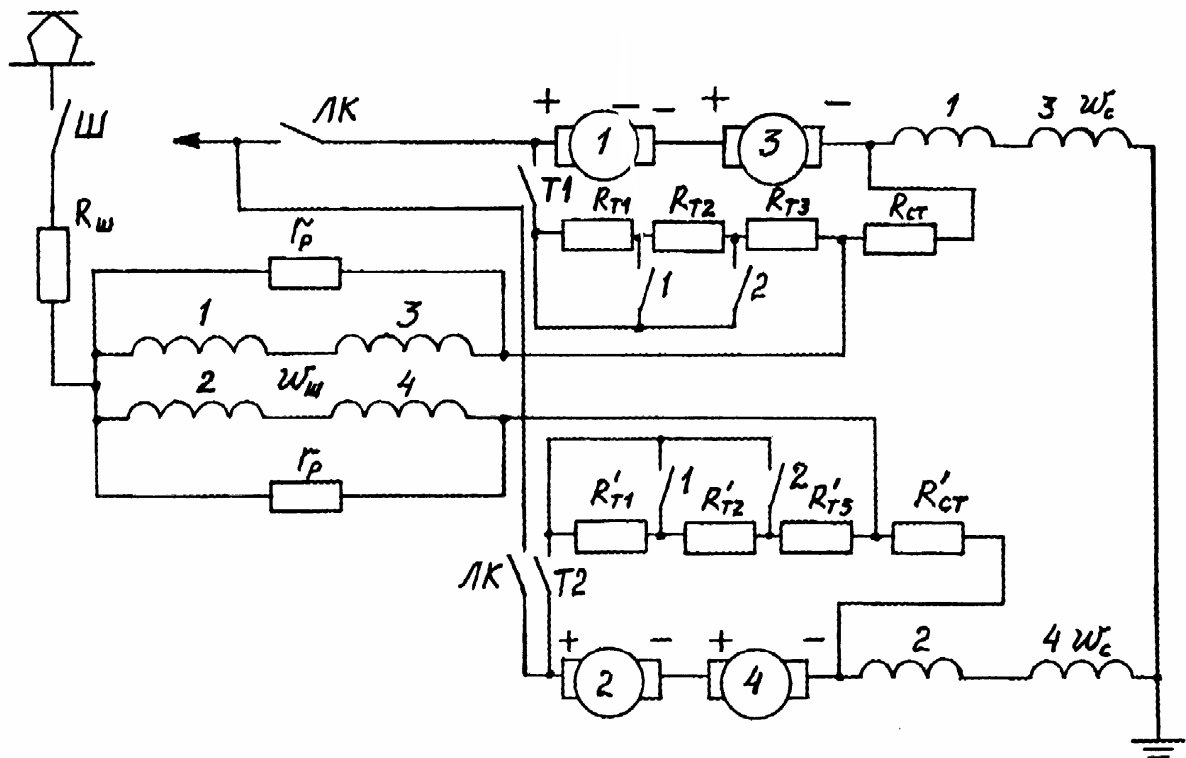


Рис. 5.20- Схема реостатного гальмування з двигунами змішаного збудження з перевагою МРС послідовної обмотки

### 5.3. Рекуперативне гальмування

*Основні рівняння.* При контакторно-реостатному керуванні для здійснення рекуперації необхідно, щоб ЕРС тягової машини або сума ЕРС тягових машин при послідовному з'єднанні перевищувала напругу контактної мережі. Цього можна досягти шляхом збільшення швидкості або магнітного потоку збудження тягових машин.

ЕРС тягового двигуна, рівна  $CV\Phi$ , врівноважує при рекуперації напругу мережі або частину напруги мережі, що приходить на один двигун, а також падіння напруги в ньому, тобто  $CV\Phi = U + Ir$ , звідки

$$I = \frac{CV\Phi - U}{r}. \quad (5.29)$$

Швидкість руху поїзда при рекуперації

$$V = \frac{U + rI}{C\Phi}, \quad (5.30)$$

а при  $n_c$  послідовно з'єднаних двигунах

$$V = \frac{U + \sum rI}{n_c C\Phi}, \quad (5.31)$$

де  $\sum rI$  - сумарне падіння напруги в силовому колі.

Гальмівна сила рекуперативного гальмування виражається загальними для всіх видів електричного гальмування формулами (5.1) і (5.2).

Коефіцієнт корисної дії  $\eta_{рек}$ , при рекуперації - це відношення відданої в мережу електричної потужності до механічної потужності гальмування, яка дорівнює  $B_K V$ :

$$\eta_{рек} = \frac{3,6 \cdot (UI - \Delta P_{II})}{B_K V}, \quad (5.32)$$

де  $\Delta P_{II}$  - потужність, Вт, споживана колами паралельного або незалежного збудження.

За формулами (5.2), (5.30) і (5.31) можна побудувати характеристики рекуперативного гальмування, якщо відома залежність магнітного потоку  $\Phi$  від струму рекуперації  $I$ .

#### **Електрична стійкість**

Електричне гальмування може бути здійснене в тому разі, якщо схема включення електричних машин при генераторному режимі задовольняє вимозі електричної стійкості.

Слід розрізняти зовнішню електричну стійкість від внутрішньої електричної стійкості. Під зовнішньою електричною стійкістю розуміється властивість відновлення стійкої електричної рівноваги системи при будь-якому відхиленні струму від сталого значення, обумовленого параметрами

зовнішнього кола.

Під внутрішньою електричною стійкістю розуміється властивість відновлення стійкої електричної рівноваги при будь-якому взаємному відносному відхиленні струмів паралельно працюючих машин або групи машин.

Поняття зовнішньої електричної стійкості може відноситися як до групи машин, так і до однієї машини; поняття внутрішньої електричної стійкості може відноситися тільки до групи машин, включених у загальну схему.

Вихідними даними для перевірки зовнішньої електричної стійкості простих систем, що складаються з одного контуру, служать зовнішні характеристики машин, що знаходяться в цьому контурі, і характеристики залежності напруги зовнішньої системи від струму в контурі. Точки перетинання цих характеристик задовольняють умові електричної рівноваги при сталому режимі. Стійкість електричної рівноваги в цих точках визначається з розгляду всіх ЕРС, що діють у контурі при перехідному процесі.

Аналізом встановлено, що загальною ознакою зовнішньої електричної стійкості нерозгалужених схем є дотримання в точках електричної рівноваги нерівності

$$\frac{dU_{\varepsilon}}{dI} < \frac{dU}{dI}, \quad (5.33)$$

де  $U_{\Gamma}$  - напруга генераторів;  $U$  - напруга зовнішнього кола.

Отже, для усталеної роботи машини на мережу з постійною напругою необхідно, щоб ця машина мала падаючу зовнішню характеристику. Цій умові задовольняють машини незалежного, паралельного і зустрічно-змішаного збудження і не задовольняють машини послідовного і згідно-змішаного збудження.

Таким чином, при контакторно-реостатному керуванні для рекуперації можуть бути застосовані тільки системи з незалежним, паралельним і зустрічно-змішаним збудженням.

### ***Рекуперативне гальмування при тягових машинах змішаного збудження***

Простіше здійснюється рекуперативне гальмування при тягових машинах змішаного збудження, що автоматично перетворюються при рекуперації в генератори зустрічно-змішаного збудження. Для переходу з рухового на генераторний режим необхідно збільшувати струм в обмотці паралельного збудження доти, поки ЕРС машин не перевищить напругу мережі. При цьому напрямок струму в якорі зміниться (рис.5.21), а напрямок МРС і магнітного потоку залишиться колишнім.

МРС збудження в генераторному режимі визначають так само, як і при реостатному гальмуванні згідно з (5.21):

$$F_B = I_{ш} W_{ш} - I W_C .$$

Швидкісні характеристики рекуперативного гальмування  $V(I)$  являють собою продовження швидкісних характеристик тягового режиму в області генераторних струмів і їх звичайно будують спільно.

Характеристики гальмівної сили  $B_K(I)$  можна визначити за (5.1); при однакових струмах у рівнобіжній обмотці  $I_{ш}$  вони є загальними для реостатного і рекуперативного гальмування. Для регулювання гальмівної сили в процесі рекуперативного гальмування використовують такі ж ступені зміни збудження, які застосовують для ослаблення поля в тяговому режимі, але їх переключають у зворотному порядку.

У системах зустрічно-змішаного збудження створюється залежна від струму рекуперації складова МРС, спрямована назустріч основній МРС. Тому залежність магнітного потоку від струму рекуперації має звичайно форму кривої СФ(I), зображеної на рис. 5.23, б. При малих струмах якоря, коли МРС велика і магнітна система тягового двигуна насичена, потік змінюється незначно. При великих же навантаженнях, коли двигун уже розмагнічений, потік швидко убуває зі збільшенням струму.

Оскільки швидкість приблизно зворотно пропорційна магнітному потокові, то при малих струмах вона змінюється незначно, а у разі збільшення струму починає швидко зростати і при струмі, що відповідає точці d, де потік близький до нуля, прагне теоретично до нескінченності.

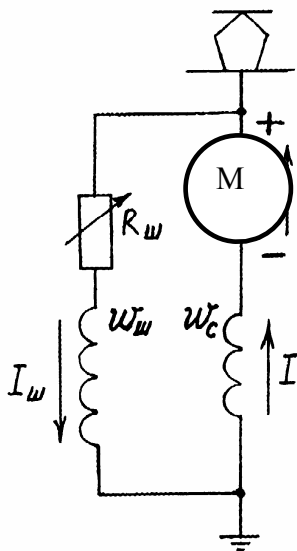


Рис. 5.21 - Схема рекуперативного гальмування двигуна змішаного збудження

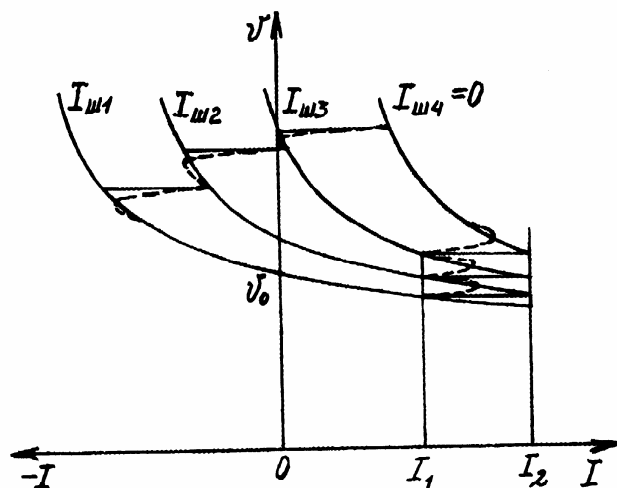


Рис. 5.22 - Швидкісні характеристики тягової машини змішаного збудження

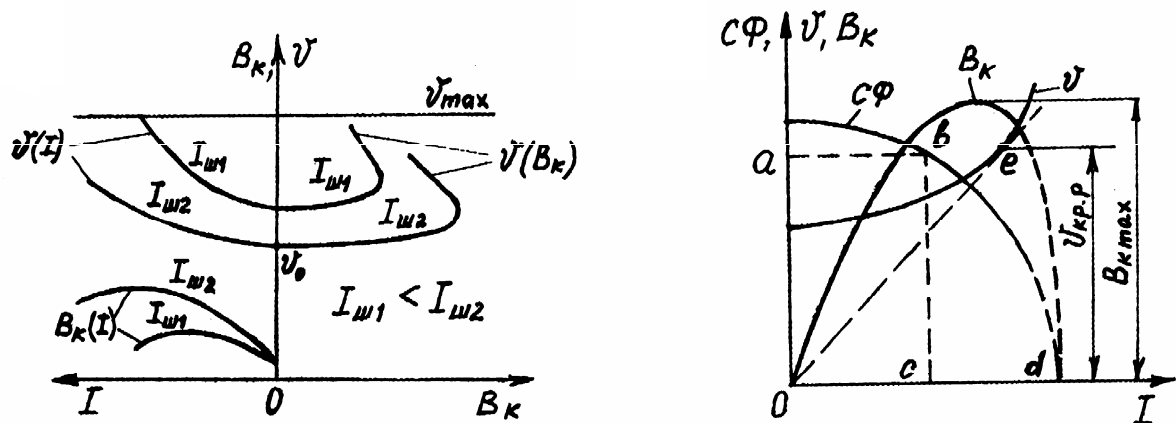


Рис. 5.23 - Характеристики рекуперативного гальмування з зустрічно - змішаним збудженням ТЕД

Гальмівні сили, приблизно пропорційні добуткові ФІ, графічно виражаються площами прямокутників  $0 a b c$  зі сторонами, рівними абсцисам і ординатам кривої  $\Phi(I)$ . Тому зі збільшенням струму рекуперації гальмівна сила спочатку зростає до деякого максимуму  $B_{k \max}$ , а потім внаслідок різкого зниження магнітного потоку починає зменшуватися і, нарешті, при навантаженні, що відповідає точці  $d$ , знижується до нуля. Отже, при швидкостях, більших критичної швидкості рекуперації  $V_{кр.р}$ , що відповідає гальмівній силі  $B_{k \max}$ , рекуперативне гальмування стає механічно не стійким.

Гальмівній силі  $B_{k \max}$  відповідає на кривій  $V(I)$  точка  $e$  зіткнення з дотичною  $Oe$ , проведеною до цієї характеристики з початку координат. Дійсно, оскільки механічна потужність гальмування  $BV/3,6$  приблизно пропорційна електричній потужності, що віддається в мережу,  $UI$ , гальмівна сила приблизно пропорційна величині  $3,6UI/V$ . Якщо  $U = \text{const}$ , найбільшим значенням гальмівної сили буде при максимумі відношення  $I/V$ . З усіх променів, проведених з початку координат до кривої  $V(I)$ , тангенси кутів нахилу яких до осі ординат пропорційні відношенню  $I/V$ , найбільше значення відношення дає дотична  $Oe$ . На рис. 5.23,а показані гальмівні характеристики  $B_k(V)$  при схемі зустрічно-змішаного збудження. Ці характеристики подібні до характеристик двигунів змішаного збудження в області негативних струмів.

Втрата механічної стійкості при швидкостях, більших за критичну, є недоліком схем зустрічно-змішаного збудження, коли рекуперативне гальмування застосовується для обмеження швидкості руху поїзда на спусках. У цих випадках для підвищення критичної швидкості, що повинна бути вище максимальних швидкостей руху на відповідних спусках, доводиться обмежувати розмагнічувальну дію струму рекуперації і виконувати характеристики більш жорсткими. Якщо ж рекуперативне гальмування використовується переважно для зупинки поїзда, що відповідає умовам



моторвагонної тяги, питання механічної стійкості не мають значення, тому що при такому гальмуванні не потрібно підтримувати незмінну швидкість, а “м'яка” гальмівна характеристика дозволяє зберігати практично незмінну гальмівну силу в широкому діапазоні швидкостей.

При виборі параметрів обмоток збудження  $W_{ш}$  і  $W_c$  необхідно враховувати вимоги як тягового режиму, так і режиму рекуперативного гальмування (значення  $I_{п}$ ,  $V_{п}$ ,  $V_0$ ,  $B_{max}$ , число ступенів пускового реостата та ін.). При надмірно високих значеннях швидкості  $V_0$ , вище якої ще можливе рекуперативне гальмування, здійснення рекуперативного гальмування на спусках може виявитися неможливим за умов безпеки, а діапазон швидкостей ефективного гальмування до зупинки - недостатнім. За інших рівних умов чим менше  $V_0$ , тим вище економічний ефект від рекуперативного гальмування.

Вибір оптимальних характеристик двигуна змішаного збудження, розрахованого на ефективне використання рекуперативного гальмування, є техніко-економічним завданням, що повинно вирішуватися з урахуванням припустимого і доцільного збільшення його розмірів для одержання необхідного діапазону швидкостей рекуперативного гальмування.

*ТЕД змішаного збудження для ЕРС міського транспорту з перевагою намагнічувальної сили паралельної обмотки виконують з додержанням відношення*

$$I_q W_c / (I_{ш. max} \cdot W_{ш}) = 0,3 \dots 0,4,$$

де  $I_q$  - струм у якорі при гинній потужності двигуна;

$I_{ш. max}$  - максимальний струм паралельної обмотки.

Звичайно  $I_{ш. max} = (1,5 \dots 2,0) I_{ш. дл}$  ( $I_{ш. дл}$  - тривалий струм обмотки паралельного збудження).

При контакторно-реостатному керуванні ЕРС постійного струму основне поширення одержали системи рекуперативного гальмування із зустрічно-змішаним збудженням. Ці системи в порівнянні з незалежним збудженням мають досить м'які характеристики, що забезпечують меншу чутливість до коливань напруги в контактній мережі і більш рівномірний розподіл навантажень між паралельно працюючими машинами в режимі рекуперації.

У даний час на ЕРС із ТЕД змішаного збудження рекуперативне гальмування застосовують тільки для гальмування на спусках і як засіб зниження швидкості. Керування цим гальмуванням здійснюється на ходових позиціях контролера керування. Його не використовують для службового гальмування перед зупинкою, тому що при цьому водій повинен виконувати значну кількість операцій в дуже короткий час, що незручно для керування.

На ЕРС міського транспорту, обладнаного ТЕД послідовного збудження, рекуперативне гальмування не одержало поширення.

#### 5.4. Електричне гальмування ЕРС постійного струму з імпульсним керуванням

**Рекуперативне гальмування.** Імпульсне керування ЕРС дозволяє здійснювати плавне регулювання швидкості не тільки в тяговому режимі, але і при електричному гальмуванні. Процес електричного гальмування істотно розрізняється при імпульсному і контакторно-реостатному керуванні. У випадку контакторно-реостатного керування рекуперація можлива лише при незалежному або змішаному збудженні і з ЕРС тягової машини, яка перевищує напругу контактної мережі. Імпульсне керування дозволяє здійснити рекуперацію, навіть якщо ЕРС менше напруги мережі й у більшості випадків при двигунах послідовного збудження. Можливо також реостатне гальмування з плавним безконтактним регулюванням швидкості, причому і при опорі гальмівного реостата, більшому за критичний.

Розглянемо принцип роботи імпульсного перетворювача в процесі рекуперативного гальмування на прикладі спрощеної схеми (рис. 5.24, а). Реактор  $L_p$  забезпечує згладжування струму в колі тягових машин, а вентиль  $V_0$  перешкоджає надходженню струму з контактної мережі в цьому колі в проміжки часу, коли напруга на двигунах менше напруги мережі.

На рис. 5.24, б наведені діаграми струмів і напруг при рекуперації за схемою рис. 5.24, а. Замкнутому положенню тиристорно-імпульсного переривника ТИП відповідає частина періоду  $t_A$ , а розімкнутому  $t_B = T - t_A$ . При вмиканні переривника утворюється контур струму тягового двигуна, що працює в генераторному режимі; він складається з двигуна, реактора  $L_p$  і переривника. Завдяки малому опору кола генераторний струм  $i_A$  збільшується з  $i_{A \min}$  до  $i_{A \max}$ , внаслідок чого зростає запас електромагнітної енергії контуру, зосереджений в основному в реакторі. У цьому інтервалі  $i_{PEK} = 0$ . Потім після запирання переривника струм двигуна починає зменшуватися і ЕРС самоіндукції, що обумовлена індуктивністю реактора  $L_p$  й обмоток двигуна, складається з ЕРС двигуна. Сума цих ЕРС перевищує напругу мережі і струм двигуна надходить у тягову мережу, незважаючи на те, що його ЕРС менше напруги мережі.

Середня напруга  $U_{д\text{ ср}}$  двигуна, що працює в генераторному режимі, врівноважується середнім за період значенням напруги  $U_c = U_{аб}$ . Тому відповідно до діаграм рис. 5.24, б

$$U_{аб} = U_{д\text{ ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{аб} dt = U \left( 1 - \frac{t_A}{T} \right) = U(1 - \lambda) . \quad (5.34)$$



підключення колоа тягової машини до контактної мережі, напруга якої спрямована зустрічно ЕРС тягового двигуна. Струм рекуперації в контактній мережі від тягової машини при відсутності  $L_\Phi - C_\Phi$  фільтра є переривчастим, при замкнутому стані ТИП він дорівнює нулю, при розімкнутому  $i_{\text{РЕК}} = i_{\text{Я}}$ . Для одержання безперервного струму рекуперації в схемі використовують  $\Gamma$ -подібний  $L_\Phi - C_\Phi$  фільтр (див. рис. 5.24, а). Завдяки фільтрові в інтервалі періоду  $(1 - \lambda)T$  енергія не повністю надходить у контактну мережу, а частково запасасться в конденсаторі  $C_\Phi$  фільтра і передається в іншу частину періоду  $\lambda T$  в контактну мережу. Це забезпечує безперервність струму рекуперації, що пульсує протягом періоду від  $i'_{\text{РЕК max}}$  до  $i'_{\text{РЕК min}}$  на рівні середнього значення  $I_{\text{РЕК CP}}$ .

Таким чином, за допомогою імпульсного регулятора виявляється можливим передати енергію від тягової машини з напругою  $U_{\text{Д CP}}$  в контактну мережу з більш високою напругою  $U$ . При цьому струм рекуперації завжди менший струму в ланцюзі якоря тягової машини:  $I_{\text{РЕК CP}} / I_{\text{Я CP}} = U_{\text{Д CP}} / U = 1 - \lambda$ . У розглянутому випадку робота імпульсного регулятора подібна до роботи підвищувального трансформатора з коефіцієнтом трансформації  $K = 1/(1 - \lambda)$ .

При схемі рис. 5.24а рекуперативного гальмування, коли ТИП розімкнутий, напруга на затисках генератора  $U_{\text{аб}}$  дорівнює напрузі на конденсаторі фільтра  $U_c$ , що при досить потужному фільтрі можна прийняти постійною і рівною середній напрузі в контактній мережі  $U$ .

Середня напруга на затисках двигуна (генератора) зв'язана з ЕРС обертання двигуна рівнянням

$$E = U_{\text{Д CP}} + I_{\text{Я CP}} R_{\text{Д}}, \quad (5.36)$$

де  $R_{\text{Д}}$  - сумарний опір послідовно з'єднаних обмоток двигуна і згладжуючого реактора.

Беручи до уваги, що  $E = CV\Phi$ , з урахуванням рівнянь (5.36) можна записати

$$V = \frac{U \cdot (1 - \lambda) + I_{\text{Я CP}} R_{\text{Д}}}{C\Phi}. \quad (5.37)$$

Для стійкого рекуперативного гальмування необхідно, щоб у режимі паузи (коли ТИП розімкнутий) струм у тяговому двигуні зменшувався. Ця умова буде виконуватися, якщо  $E < U \cdot (1 - \lambda) + I_{\text{Я CP}} R_{\text{Д}}$ . Вона повинна виконуватися при будь-яких можливих значеннях  $\lambda$ . Отже, найбільша або критична швидкість  $V_{\text{кр}}$ , при якій рекуперативне гальмування буде ще стійким, залежить від напруги в контактній мережі, магнітного потоку і струму в двигуні, а також від коефіцієнта заповнення  $\lambda$ . Причому найбільша критична

швидкість гальмування відповідає мінімальному значенню коефіцієнта заповнення регулятора  $\lambda_0$ , що залежить від швидкодії тиристорів регулятора, а також схеми самого регулятора

$$V_{KP} = \frac{U \cdot (1 - \lambda_0) + I_{Я\text{ CP}} R_D}{C\Phi} . \quad (5.38)$$

Мінімальна швидкість  $V_{min}$ , при якій припиняється рекуперація енергії в мережу, відповідатиме  $\lambda = 1$ . Відповідно до рівняння (5.38) маємо

$$V_{min} = \frac{I_{Я\text{ CP}} R_D}{C\Phi} . \quad (5.39)$$

Для рухомого складу  $V_{min} = (2...4)$  км/г, тобто при імпульсному керуванні рекуперативне гальмування може здійснюватися практично до повної зупинки.

З виразу (5.35) випливає

$$I_{PEK\text{ CP}} = I_{Я\text{ CP}} \cdot (1 - \lambda) . \quad (5.40)$$

Таким чином, у діапазоні зміни швидкості руху  $V_{KP} \leq V \leq V_{min}$  струм, що віддається в контактну мережу, змінюється в діапазоні  $(1 - \lambda_0)I_{Я\text{ CP}} \leq I_{PEK\text{ CP}} \leq 0$  (рис. 5.25).

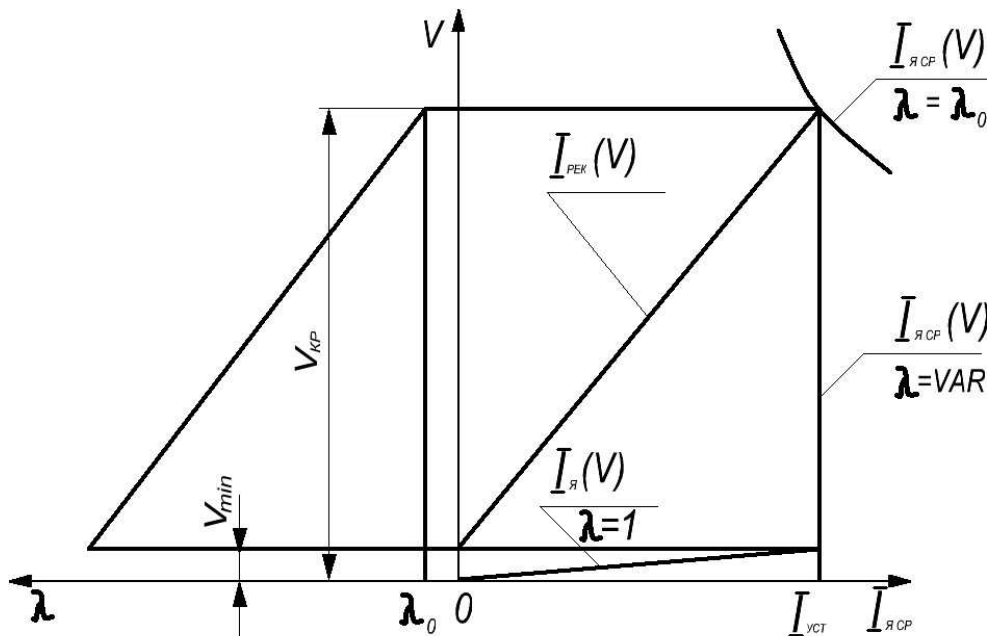


Рис. 5.25 - Залежності  $I_{Я\text{ CP}}(V)$ ,  $I_{PEK\text{ CP}}(V)$ ,  $\lambda(V)$  при рекуперативному гальмуванні

Характер зміни середнього струму рекуперації  $I_{PEK\text{ CP}}$  від швидкості руху

рухомого складу можна визначити зі спільного рішення рівнянь (5.39) і (5.40):

$$I_{PEK\ CP} = \frac{I_{Я\ CP}}{U} (CV\Phi - I_{Я\ CP} R_D) . \quad (5.41)$$

Відповідно до рівняння (5.41) залежність  $I_{PEK\ CP}(V)$  є лінійною і струм рекуперації  $I_{PEK\ CP}$  пропорційний швидкості рухомого складу  $V$ . У процесі рекуперативного гальмування середнє значення струму в тяговому двигуні  $I_{Я\ CP}$  підтримується постійним, рівним струму  $I_{Я\ УСТ}$  уставки, що задається водієм. При цьому регулятор повинен працювати з коефіцієнтом заповнення, який визначається з виразу (5.38):

$$\lambda = 1 - \frac{CV\Phi - I_{Я\ CP} R_D}{U} . \quad (5.42)$$

Процес підтримки струму  $I_{Я\ CP} = I_{Я\ УСТ} = \text{const}$  закінчується при  $\lambda = 1$ , коли коло тягової машини замикається регулятором накоротко і  $U_{Д\ CP} = 0$ .

При послідовному збудженні не можна зберегти в режимі рекуперації просте паралельне з'єднання тягових машин або їхніх груп, тому що рівнобіжна робота їх у генераторному режимі електрично не стійка. Тому доводиться або жити кожен групу послідовно з'єднаних машин від окремого перетворювача або фази, або застосовувати схеми включення, які використовуються при реостатному гальмуванні паралельно включених двигунів послідовного збудження. Крім того, виникають труднощі зі забезпеченням самозбудження тягової машини, тому що воно повинно відбуватися при роботі на переривчасте коло, що складається з переривника і навантажувального (згладжуючого) реактора. Тому потрібний спеціальний малопотужний збуджувач, короткочасно підживлюючий обмотку збудження в момент переходу на рекуперативне гальмування.

Для електричного гальмування можуть бути використані ті ж типи переривників (регуляторів), що й у тяговому режимі.

Незалежно від системи імпульсних перетворювачів розрізняють два способи їхнього застосування на електричному рухомому складі. У першому з них перетворювачі залишаються включеними протягом усього часу роботи тягових двигунів; при цьому номінальна напруга кола двигунів може відрізнятися від напруги тягової мережі. Як правило, напруга мережі значно вище сумарної напруги тягових машин. У цьому випадку імпульсний переривник, що працює протягом усього часу включення двигунів, виходить більш важким і дорогим, ніж при використанні його тільки при електричному гальмуванні, зато більш повно можна реалізувати переваги імпульсного керування. При цьому імпульсне керування режимом рекуперації можна здійснити без додаткових пристроїв у всьому діапазоні швидкостей. При другому способі імпульсні перетворювачі включають тільки в періоди пуску й електричного гальмування. Така система можлива тільки у випадку, якщо

тяговий двигун або група послідовно з'єднаних двигунів розраховані на роботу при напрузі контактної мережі. Тому в режимі рекуперативного гальмування при високих швидкостях ЕРС тягових машин може виявитися вище напруги мережі. Для забезпечення можливості імпульсного керування необхідно знизити напругу, одержану від рекуперуючих машин. Найбільш просто це досягається включенням послідовно з імпульсним перетворювачем додаткового резистора  $R_{доб}$ . Опір цього резистора вибирають так, щоб різниця напруги тягових машин і падіння напруги в резисторі були менші напруги мережі. У резисторі губиться при гальмуванні 15...20 % енергії рекуперації, але забезпечується можливість рекуперативного гальмування в широкому діапазоні швидкостей. Для зменшення цих втрат енергії доцільно відключати резистор  $R_{доб}$  після того, як швидкість двигуна знизиться настільки, що сума ЕРС усіх послідовно включених тягових машин стане меншою напруги мережі.

**Реостатне гальмування.** За схемою рис. 5.24,а, яка використовується для рекуперативного режиму, можна здійснити також плавне імпульсне реостатне гальмування без регулювання опору гальмівного реостата. Розходження полягає лише в тому, що перетворювач не приєднується до живлячої мережі, а замикається на гальмівний резистор  $R_T$ . Робочі процеси при рекуперативному і реостатному гальмуванні майже однакові і відрізняються тільки тим, що при рекуперації вся система працює на мережу приблизно постійної напруги, а при реостатному - на резистор, напруга на якому пропорційна струму. Реостатне гальмування можливе при тягових машинах різних систем збудження, в тому числі послідовному, і опорі гальмівного резистора, більшому за критичний. У випадку декількох рівнобіжних груп тягових двигунів слід використовувати для забезпечення їхньої паралельної роботи спеціальні схеми керуванні.

На рис. 5.26 наведена найпростіша схема імпульсного регулювання процесу реостатного гальмування двигуна послідовного збудження. Робочий процес при цій схемі ілюструється тими ж діаграмами рис. 5.24, б, що були побудовані раніше стосовно рекуперативного гальмування, з тією лише зміною, що замість напруги  $U$  повинно бути прийнято падіння напруги  $I_T R_T$  в гальмівному резисторі.

Реостатне гальмування починається при відключенні перетворювача від контактної мережі і включенні контактора  $K$ . Включеному стану переривника ТИП відповідає інтервал  $t_A = \lambda T$ , а відключеному - інтервал  $t_B = (1 - \lambda)T$ . Якщо опір резистора  $R_T$  більший критичного, самозбудження тягової машини при відключеному ТИП неможливе.

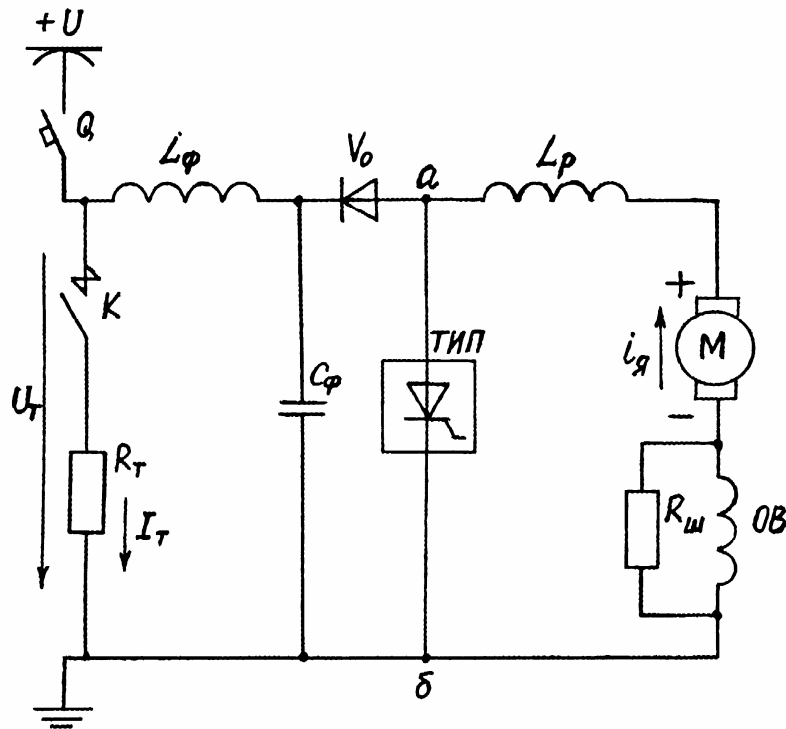


Рис. 5.26 - Принципова схема реостатного гальмування двигуна послідовного збудження з використанням тиристорно-імпульсного регулятора

Реостатне гальмування починається при відключенні перетворювача від контактної мережі і включенні контактора К. Включеному стану переривника ТИП відповідає інтервал  $t_A = \lambda T$ , а відключеному - інтервал  $t_B = (1 - \lambda)T$ . Якщо опір резистора  $R_T$  більший критичного, самозбудження тягової машини при відключеному ТИП неможливе. При включеному переривнику для тягової машини утвориться контур, що складається з цієї машини, реактора  $L_p$  і переривника ТИП, який можна вважати короткозамкненим. Відбувається інтенсивне самозбудження машини, її струм зростає, збільшується запас електромагнітної енергії в контурі реактора  $L_p$ .

Після відключення переривника струм тягової машини зменшується, завдяки чому сума її ЕРС і ЕРС самоіндукції стає достатньою для підтримки струму в резисторі, незважаючи на те, що його опір більший критичного.

Завдяки вхідному фільтру  $L_\phi - C_\phi$  можна прийняти, що струм  $I_T$  гальмівного резистора залишається практично незмінним протягом усього періоду. З рис. 5.26 випливає, що

$$I_T = I_{я\text{ ср}}(T - t_A)/T = I_{я\text{ ср}}(1 - \lambda), \quad (5.43)$$

де  $I_{я\text{ ср}}$  - середній струм тягової машини.

Відповідно до формули (5.43) напругу  $U_T$  на резисторі можна прийняти

$$U_T = I_T R_T = I_{я\text{ ср}} R_T (T - t_A)/T = I_{я\text{ ср}} R_T (1 - \lambda). \quad (5.44)$$



Напруга в ланцюзі тягової машини дорівнює нулю в інтервалі  $t_A = \lambda T$  і напрузі  $U_T$  в інтервалі  $T - t_A = (1 - \lambda)T$ . Отже, середня напруга тягової машини

$$U_{д\text{ }cp} = U_T(T - t_A) / T = I_{я\text{ }cp} R_T (1 - \lambda)^2. \quad (5.45)$$

Оскільки напруга  $U_{д\text{ }cp}$  приблизно пропорційна швидкості руху, а гальмівна сила залежить від струму якоря машини, з формули (5.45) виходить, що регулювання гальмівної характеристики і всього гальмівного процесу можна здійснити, змінюючи коефіцієнт заповнення імпульсів  $\lambda$ . Зокрема, як впливає з формули (5.45), для підтримки незмінного струму і незмінної гальмівної сили при реостатному гальмуванні необхідно змінювати величину  $(1 - \lambda)$  приблизно пропорційно  $\sqrt{V}$ . При частотному керуванні в міру зниження швидкості варто збільшити частоту, а при широтному - збільшувати тривалість замкнутого стану переривника.

При імпульсному керуванні реостатне гальмування використовується переважно для заміщення рекуперативного при відсутності на лінії достатнього навантаження для забезпечення необхідного гальмівного ефекту. На рис. 5.27 показана одна з можливих схем рекуперативно-реостатного гальмування. При навантаженні тягової мережі, недостатньому для сприйняття всієї потужності рекуперації, підвищується напруга на конденсаторі фільтра. Внаслідок цього спрацьовує система вмикання гальмівного тиристора  $V_T$ , що включає гальмівний резистор  $R_T$ . Тим самим рекуперативне гальмування заміщується реостатним.

При черговому включенні ТИП зворотною напругою закривається і тиристор  $V_T$ . Він може знову відімкнутися в наступних циклах, тільки якщо недостатнє споживання енергії в мережі і відповідно підвищується її напруга. Якщо ж навантаження достатнє для сприйняття енергії рекуперації, напруга не підвищується, не включається гальмівний резистор  $R_T$  і, отже, відновлюється рекуперативне гальмування.

У схемі рис. 5.27 на відміну від схеми рис. 5.26 струм  $i_T$  резистора  $R_T$  виходить переривчастим, тому що резистор включається між переривником і фільтром. Протягом частини періоду  $T - t_A$  цей струм дорівнює струму  $I_{я\text{ }cp}$  тягової машини, а в інший час - нулю. Напруга як на резисторі, так і на тяговій машині дорівнює  $I_{я\text{ }cp} R_T$  в інтервалі  $T - t_A$  і нулю в інтервалі  $t_A$ . Звідси легко одержати значення середніх струмів і напруг:

$$I_T = I_{я\text{ }cp} (1 - t_A / T) = I_{я\text{ }cp} (1 - \lambda); \quad (5.46)$$

$$U_T = U_{д\text{ }cp} = I_{я\text{ }cp} R_T (1 - t_A / T) = I_{я\text{ }cp} R_T (1 - \lambda). \quad (5.47)$$



9. З якою метою застосовують перехитну схему включення обмоток збудження при реостатному гальмуванні в багатодвигунових приводах?
10. Які переваги має імпульсний спосіб регулювання гальмівної сили при реостатному гальмуванні?
11. Які переваги та недоліки має рекуперативне гальмування?
12. Як виконується рекуперативно-реостатне гальмування?
13. За рахунок зміни якого параметру виконується регулювання гальмівної сили при застосуванні імпульсних схем?

## 6. МЕХАНІЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ ПОЇЗДА

### 6.1. Загальні положення

Гальмування застосовується для зупинки поїзда й утримання його в нерухомості, а також для обмеження швидкості поїзда на спусках, перед кривими ділянками і відповідними колійними знаками. Воно здійснюється за рахунок додатка до поїзда керованих сил, спрямованих проти руху. Ці сили, які штучно збільшують опір руху, називають *гальмівними*.

За характером використання гальмівної сили розрізняють службове (робоче) гальмування й екстрене (аварійне). Службове гальмування застосовується в нормальних умовах роботи, екстрене – для попередження нещасних випадків і аварій. Воно забезпечує найбільше уповільнення і найменший гальмівний шлях, який проходить потяг з моменту початку гальмування до зупинки.

Здійснення гальмівного режиму засновано на перетворенні за короткий час енергії рушійного поїзда в роботу гальм. Тому для швидкої зупинки поїзда потрібна велика гальмівна сила.

Процес гальмування залежить головним чином від *гальмівної характеристики поїзда  $B(V)$* . Відповідно до цього  $b(V)$  називають *питомою гальмівною характеристикою поїзда*.

За способом створення гальмівної сили розрізняють механічні і електричні системи гальмування. У *механічних гальмах* кінетична енергія поїзда перетворюється в роботу тертя, що витрачається на стирання і нагрівання поверхонь. При *електричному* гальмуванні кінетична енергія поїзда - перетворена в електричну енергію, або поглинається в резисторах рухомого складу і розсіюється у виді тепла в навколишньому середовищі, чи повертається в контактну мережу. У першому випадку електричне гальмування є *реостатним*, у другому - *рекуперативним*. Системи електричного гальмування засновані на принципі зворотності електричних машин, тобто на переході тягових машин з двигунового в генераторний режим. Момент, який потрібний для обертання генератора, реалізується на ободу рушійного колеса у виді гальмівної сили.

Процес гальмування повинний бути дуже надійним. Тому кожен тип рухомого складу, у тому числі й електричний, обладнається, як мінімум, двома незалежними друг від друга системами гальм. На електрорухомому складі міського транспорту це електричне гальмування, що використовується як робоче, і механічне гальмування, що використовується і як аварійне, і як робоче (для гальмування при низьких швидкостях руху, коли електричне гальмування стає неефективним).

Нижче розглянуті механічні (колісно-колодкові, барабанні, дискові) гальма, у яких використовуються сили тертя, а також рейкові електромагнітні гальма.

## 6.2. Колісно-колодкове гальмо

При колісно-колодковому гальмі гальмівна сила створюється в результаті натискання гальмівних колодок на колесні бандажі (рис. 6.1). Якщо  $K$  - сила натискання колодки на бандаж, кН;  $\phi_k$  - коефіцієнт тертя між бандажем і колодкою, то гальмівна сила, Н, що розвивається колодкою

$$B_k = 1000K\phi_k . \quad (6.1)$$

Гальмівна сила  $B$  поїзда дорівнює сумі гальмівних сил колодок рухомого складу:

$$B = 1000 \sum K\phi_k . \quad (6.2)$$

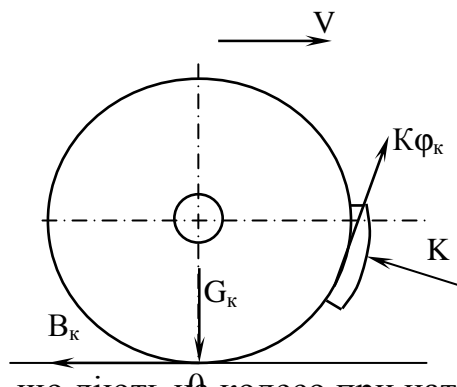


Рис. 6.1 - Схема сил, що діють на колесо при натисканні гальмівної колодки  
Питома гальмівна сила, Н/кН, при масі  $m$  поїзда

$$b = 1000 \frac{\sum K\phi_k}{mg} . \quad (6.3)$$

Колісно-колодкове гальмо, що широко застосовується на магістральному залізничному рухомому складі і на вагонах метрополітену на трамвайних вагонах не застосовується. Для зменшення шуму на трамваї в даний час застосовується підресорювання бандажів через спеціальні гумові прокладки, що ускладнюють відвід тепла від бандажів. Бандажі в процесі гальмування можуть перегрітися і відбудеться аварія. Тому як на трамваї, так і на тролейбусі встановлюють спеціальні гальмівні барабани, зв'язані з колесами, на які і давлять при гальмуванні колодки.

### 6.3. Барабанне гальмо

Схема барабанного гальма трамвайних моторних вагонів показана на рис. 6.2. Гальмівний барабан діаметром  $D_8 = 140 \dots 250$  мм насаджують на кінець вала якоря тягових двигунів чи хвостовик шестірні редуктора.

Зовні до барабана, що виготовляється, як правило, зі сталі, прижимаються дві колодки з асбофрикційними чи металокерамічними накладками шириною від 60 до 100 мм. Натискання колодок здійснюється під дією пневматичного чи електромагнітного приводу через важільну передачу. Для того щоб натискання від колодок на гальмівний барабан врівноважувалося, тобто вал барабана не випробував згинаючого моменту, гальмівні колодки розташовують симетрично (див. рис. 6.2).

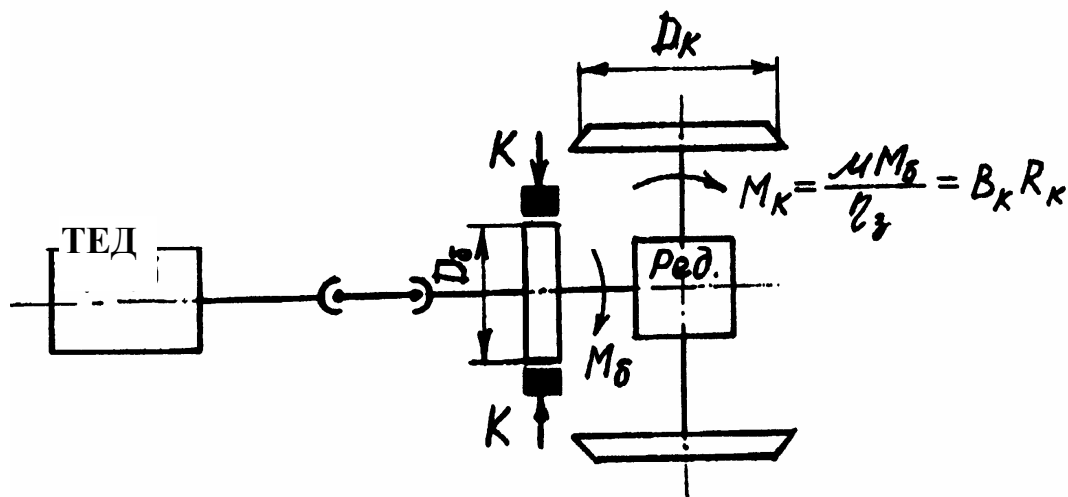


Рис. 6.2 – Схема барабанного гальма трамвая

Якщо  $K$  - сила натискання на одну колодку, кН, то виникаючі при цьому сили тертя між колодками і гальмівним барабаном створять гальмівний момент, кН/м,

$$M_{\delta} = nK\phi_k R_{\delta}, \quad (6.4)$$

де  $n$  - число гальмівних колодок;

$\varphi_k$  - коефіцієнт тертя між поверхнею гальмівного барабана і колодкою;

$R_\delta$  - радіус гальмівного барабана, м.

Гальмівний момент, прикладений до гальмівних коліс, залежить від передаточного числа  $\mu$  редуктора і його коефіцієнта корисної дії  $\eta_3$  й визначається виразом:

$$M_k = \frac{\mu M_\delta}{\eta_3}, \quad (6.5)$$

Гальмівна сила на ободі гальмівних коліс, що відповідає цьому моменту, Н,

$$B_k = 1000 \frac{\mu M_\delta}{\eta_3 R_k} = 1000 \frac{\mu}{\eta_3} \frac{R_\delta}{R_k} n K \varphi_k = 1000 K_\Pi \varphi_k, \quad (6.6)$$

де

$$K_\Pi = \frac{\mu}{\eta_3} \frac{R_\delta}{R_k} n K. \quad (6.7)$$

$K_\Pi$  - приведена до обода гальмівних коліс сила натискання гальмівних колодок, кН.

На тролейбусах гальмівні барабани кріплять безпосередньо до ступиць коліс, тому у формули (6.6) і (6.7) варто підставляти значення  $\mu = 1$  і  $\eta_3 = 1$ .

При заданій силі  $K$  натискання на гальмівні колодки гальмівна сила  $B_k$  залежить від коефіцієнта тертя  $\varphi_k$ .

#### **6.4. Коефіцієнт тертя**

Коефіцієнт тертя гальмівних колодок об барабан (бандаж) залежить в основному від матеріалу тертьових поверхонь, швидкості тертьової поверхні гальмівного барабана (бандажа), а отже, швидкості руху, і сили натискання  $K$  на гальмівну колодку. На значення  $\varphi_k$  впливає також форма гальмівної колодки, стан тертьових поверхонь і температура.

Гальмівні колодки виготовляють з різних матеріалів. Найбільше дешевим є виготовлення гальмівних колодок з чавуна. Однак такі колодки володіють тим недоліком, що відносно швидко зношуються і, перетворюючись в чавунний пил, засмічують гальмівний пристрій і навколишнє середовище. З ростом швидкості руху коефіцієнт тертя чавунних колодок вагомо знижується (рис. 6.3). Кращі показники мають гальмівні колодки, виготовлені зі спеціальних матеріалів, так званих композиційних складів. У такі композиції входять складовими частинами азбест, каучук, бакиліт, дерев'яні обпилювання й інші матеріали. Ці колодки в процесі гальмування згорають, тобто

перетворюються в основному в газу і випаровуються. Коефіцієнт тертя цих колодок значно більше, ніж у чавунних і в меншому ступені знижується з ростом швидкості (див. рис. 6.3); зносостійкість у кілька разів більше, ніж у чавунних. Однак у зимових умовах композиційні схильні до зледеніння і через малу теплопровідність.

Підставою для визначення значення коефіцієнта тертя можуть служити тільки досвідні дані. З урахуванням проведених іспитів запропоновані наступні залежності:

для чавунних колодок і сталевго колеса

$$\varphi_K = 0,6 \frac{1,63K + 100}{8,15K + 100} \cdot \frac{V + 100}{5V + 100} \quad (6.8)$$

і для композиційних колодок і сталевго колеса

$$\varphi_K = 0,44 \frac{0,102K + 20}{0,41K + 20} \cdot \frac{V + 150}{2V + 150} \quad (6.9)$$

У цих виразах сила натискання  $K$  вимірюється в кН, а швидкість  $V$  - у км/год.

Криві залежностей (6.8) і (6.9) при натисканні на гальмівні колодки  $K=20$  кН приведені на рис. 6.3.

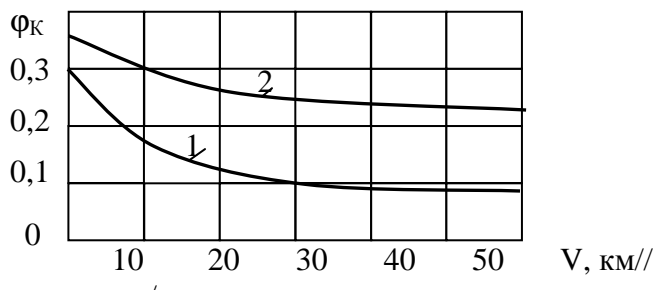


Рис. 6.3 – Криві залежності  $\varphi_K(V)$  при чавунних (1) і композиційних (2) колодках

З виразів (6.8) і (6.9) випливає, що зі збільшенням сили натискання  $K$  на колодку коефіцієнт тертя  $\varphi_K$  зменшується. З ростом швидкості руху  $V$  коефіцієнт  $\varphi_K$  також знижується. При високих швидкостях руху, особливо для композиційних колодок, коефіцієнт тертя стає  $\varphi_K$  практично постійним. Тому для одержання надійно працюючого гальмівного пристрою доцільне застосування більшого числа колодок з меншим зусиллям  $K$  на колодку і з більшою швидкістю на поверхні гальмівного барабана, тобто гальмівний барабан доцільно встановлювати на валу двигуна чи на вхідному валу редуктора.

### 6.5. Розрахунок гальмівної сили поїзда

Гальмівна сила поїзда  $B$  дорівнює сумі гальмівних сил, що розвиваються всіма гальмівними пристроями:

$$B = \sum B_k = 1000 \varphi_k \sum K_n. \quad (6.10)$$

При тягових розрахунках зручно користатися питомими значеннями гальмівної сили, Н/кН:

$$b = 1000 \varphi_k \frac{\sum K_n}{mg} = 1000 \varphi_k \theta, \quad (6.11)$$

де  $m$ -маса поїзда, т;  $g$ -прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>; множник

$$\theta = \frac{\sum K_n}{mg} \quad (6.12)$$

називають *гальмівним коефіцієнтом* поїзда, що являє собою відносне значення сумарної приведеної сили натискання гальмівних колодок, тобто сумарну приведену силу натискання гальмівних колодок, яка приходить на 1 кН ваги поїзда.

Користаючись залежностями  $\varphi_k(v)$ , по виразу (6.11) можна побудувати характеристику питомої гальмівної сили поїзда  $b(v)$ .

Середнє значення коефіцієнта тертя  $\varphi_k$  барабанного гальма лежить у межах 0,26...0,32.

### 6.6. Обмеження сили натискання колодок по зчепленню

Приведене сумарне натискання  $\sum K_n$  гальмівних колодок - важливий розрахунковий параметр для конструювання гальмівної системи. Збільшення сили натискання колодок на фрикційну деталь приводить до збільшення гальмівної сили. Однак при цьому не повинний бути порушений закон зчеплення. На рис. 6.4 показана залежність гальмівної сили від натискання колодок. Доти поки умови зчеплення не порушені, гальмівна сила  $B$  росте майже пропорційно натисканню  $\sum K_n$ . Але як тільки гальмівна сила перевищить силу зчеплення і наступить юз, гальмівна сила різко знижується, а потім залишається незмінною, скільки б не збільшувалось натискання колодок, тому що при юзі гальмівна сила створюється тільки за рахунок тертя ковзання бандажа по рейці. Коефіцієнт тертя ковзання колеса  $\varphi_{ск}$  менше коефіцієнта зчеплення  $\psi$  колеса, яке нормально котиться і є коефіцієнтом тертя котіння.



Для барабанного гальма з обліком виразу(6.10) для запобігання юза необхідно дотримуватись умови

$$1000\varphi_K \sum K_n \leq 1000G_T\psi, \quad (6.13)$$

$$\varphi_K \sum K_n \leq G_T\psi. \quad (6.14)$$

Звідси

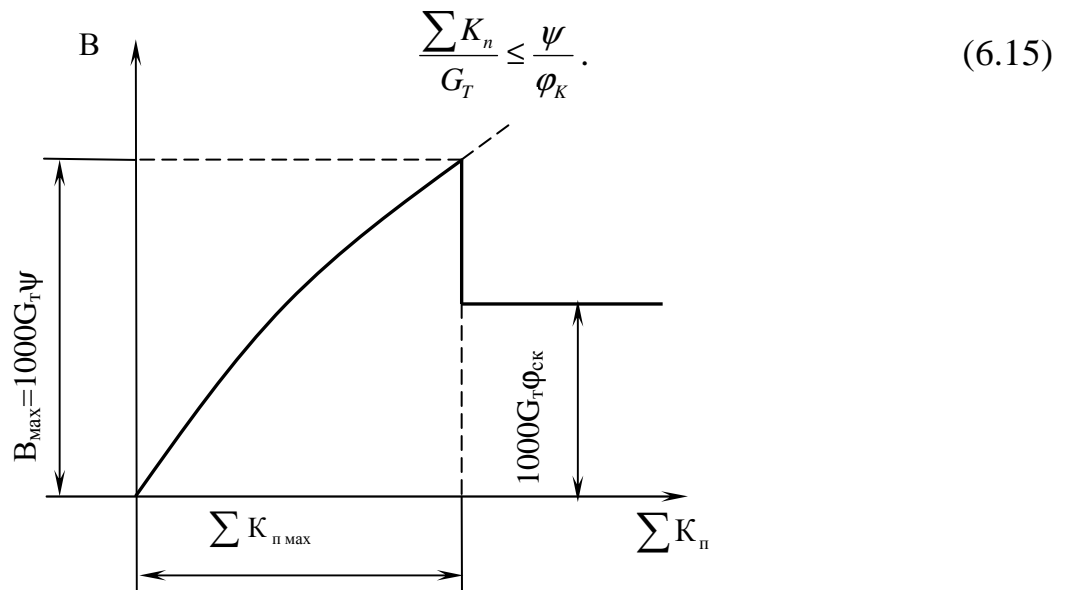


Рис.6.4 – Залежність гальмівної сили від натискання гальмівних колодок

Відношення найбільшого сумарного натискання гальмівних колодок  $\sum K_{п max}$  до сили натискання гальмівних коліс на рейки чи полотно дороги  $G_T$  називають *коефіцієнтом натискання  $\delta$  гальмівних колодок*:

$$\delta = \frac{\sum K_{п max}}{G_T}. \quad (6.16)$$

З нерівності (6.15) випливає, що значення  $\delta$  повинне бути менше відношення  $\psi / \varphi_K$ , тобто сила натискання обмежена зчепленням коліс з рейкою чи полотном дороги. За умови, що всі вісі (колеса) рухомого складу гальмівні і,

отже, гальмівна вага  $G_T$  дорівнює вазі поїзда  $G=mg$ , найбільший гальмівний коефіцієнт буде дорівнювати коефіцієнту натискання:  $\theta_{\max} = \delta$ . Таке значення гальмівного коефіцієнта варто вибирати при екстреному гальмуванні. При робочому гальмуванні гальмівний коефіцієнт  $\theta = (0,6 \dots 0,7) \theta_{\max}$ .

Величину коефіцієнта натискання вибирають так, щоб одержати по можливості найбільшу гальмівну силу і у той же час не допустити заклинювання коліс. Найбільша небезпека заклинювання коліс при гальмуванні виникає при малих швидкостях руху, тому що коефіцієнт зчеплення в меншому ступені, чим коефіцієнт тертя колодок, залежить від швидкості руху поїзда. Найгірші умови будуть відповідати мінімальному коефіцієнту зчеплення при максимальному коефіцієнті тертя. У розрахунках приймають наступні значення коефіцієнта натискання  $\delta$  від гальмівної ваги  $G_T$  порожнього поїзда: для вагонів метрополітену при колісно-колодковому гальмі  $\delta = 0,5 \dots 0,6$ ; для вагонів трамвая при барабанних і дискових гальмах  $\delta = 0,7 \dots 0,9$ ; для тролейбусів  $\delta = 1,5 \dots 2,0$ ; для трамвайних вагонів з рейковим електромагнітним гальмом  $\delta = 2$ . Знаючи коефіцієнт натискання колодок, за формулою (6.16) можна визначити сумарну максимальну силу натискання всіх колодок поїзда  $\sum K_{n\max} = \delta \cdot G_T$ , де  $G_T$  - гальмівна вага порожнього поїзда.

Імовірність виникнення юза залежить і від режиму гальмування, тобто від інтенсивності зміни гальмівної сили в процесі гальмування. Найкраще використання сили зчеплення виходить при режимі, коли гальмівна сила інтенсивно наростає на початку гальмування, а потім інтенсивність її поступово зменшується. Однак різке наростання гальмівної сили викликає утворення великих подовжніх зусиль у потязі, що можуть привести до порушення безпеки руху. Тому інтенсивність гальмування встановлена теоретичним шляхом і повинна бути перевірена експериментально.

### 6.7. Дискові гальма

Основна їхня відмінність полягає в тому, що гальмівна сила створюється в результаті тертя гальмівних колодок об обертові фрикційні диски, що зв'язані з колесними парами чи з валами тягових двигунів. Якщо обертові елементи гальма мають плоску поверхню, то такі гальма називаються дисковими.

Сила тертя, що виникає між гальмівною колодкою (накладкою) і обертовим гальмівним диском, створює гальмівний момент,  $N \cdot m$ ,

$$M_T = 1000 \cdot K_T \varphi_T R_T \mu_T, \quad (6.17)$$

де  $K_T$  - сумарна сила натискання гальмівних колодок (накладок), кН;

$\varphi_T$  - коефіцієнт тертя між гальмівною колодкою і гальмівним диском;

$R_T$  - радіус (плече) додатка сили натискання гальмівної колодки, м;

$\mu_T$  - передаточне число ричажної передачі.

Гальмівна сила, яка приведена до обода колеса, Н,

$$B_{TK} = 1000 K_T \varphi_T \mu_T R_T / R_{KT},$$

де  $R_{KT}$  - радіус гальмівних колес, м.

При однотипних колодках і колесних парах поїзда, що мають дискові гальма, питома гальмівна сила, Н/кН,

$$b_T = 1000 \varphi_T \mu_T \frac{R_T}{R_{KT}} \cdot \frac{\sum K_T}{mg}. \quad (6.18)$$

Позначивши  $\frac{\mu_T R_T}{R_{KT}} \cdot \frac{\sum K_T}{mg} = \theta_D$ , одержимо

$$b_T = 1000 \varphi_T \theta_D. \quad (6.19)$$

Максимальне натискання гальмівних колодок дискових гальм визначається, як і при колесно-колодковому і барабанному гальмах, максимальним коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками. Коефіцієнт тертя  $\varphi_T$  залежить від матеріалу колодок (накладок) і диска. Звичайно накладки виконують з асбофрикційних матеріалів (композиція азбестових матеріалів, бакеліту, ебоніту і т.п.). Гальмівні диски звичайно литі, із сірого чавуна. Тому що при терті накладок об диски в процесі гальмування виділяється велика кількість тепла, до матеріалу дисків і накладок пред'являються особливі вимоги у відношенні теплотривалості і термоусталості.

Коефіцієнт тертя дискових гальм відносно високий (0,25...0,35) і в робочій зоні практично не залежить від швидкості. Недоліком дискових гальм є різке зменшення сили натискання на гальмівні колодки при зносі деталей привідної передачі.

Загальним недоліком розглянутих видів механічних гальм є те, що найбільше натискання колодок обмежене умовами зчеплення колес з рейками чи дорогою. Тим самим обмежуються максимально можливі гальмівні сили й уповільнення. Найбільші уповільнення при гальмуванні в цих системах не перевершують 1,5...2,0 м/с<sup>2</sup>. Тим часом при екстремому гальмуванні такі уповільнення недостатні, тому при наявності тільки механічного гальма небезпечно розвивати високі швидкості руху. Особливо це відноситься до того виду міського електричного транспорту, в якого немає індивідуального полотна, ізолюваного від пішоходів і інших видів транспорту.

## 6.8. Електромагнітні рейкові гальма

Рейкові гальма дозволяють розвивати гальмівні сили, необмежені зчепленням коліс з рейками. Відомі два види електромагнітних рейкових гальм: магнітно-рейкові, при яких здійснюється притиснення спеціальних гальмівних башмаків до рейок, і гальма, у яких використовується гальмівний ефект від вихрових струмів, що наводяться в рейках за допомогою обмоток спеціальних башмаків, і не стикаються з рейками.

У магнітно-рейкових гальмах гальмівна сила виникає в результаті притиснення башмаків до рейок і передається на візок через її боковини. Тому реалізовані гальмівні сили не обмежені зчепленням коліс з рейками.

При рейкових гальмах, заснованих на дії вихрових струмів, щоб забезпечити достатню ефективність гальмування, обмотки гальмівних башмаків повинні створювати сильне магнітне поле в рейках і, як наслідок, сильні вихрові струми. На створення таких полів витрачається електричної енергії в багато разів більше, ніж у магнітно-рейкових гальмах. Достоїнством гальмування вихровими струмами - незалежність гальмівної сили від стану поверхонь рейки і бандажа, ступеня їхнього забруднення і сили зчеплення між ними. В даний час рейкові гальма, засновані на дії вихрових струмів, знаходяться в стадії розробок і призначені для ЕРС з електричним гальмуванням, при якому енергія, яка генерується тяговими двигунами, витрачається на збудження котушок гальмівних башмаків.

Магнітно-рейкове гальмо засноване на використанні сили електромагнітного притиснення до рейок спеціальних гальмівних башмаків, пружно підвішених до бічних балок рами візка (рис. 6.5, а). Гальмівні башмаки мають обмотки збудження, при живленні яких струмом виникає магнітний потік, що охоплює осердя башмака і рейку (рис. 6.5, б).

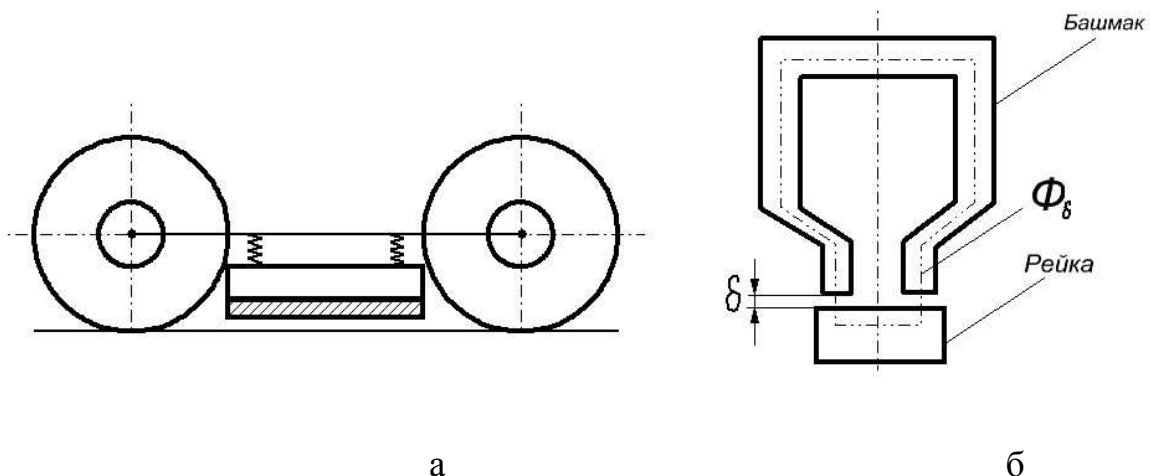


Рис. 6.5 – Схема (а) і магнітне коло (б) магнітно-рейкового гальма

Утворюється сила взаємодії, що притягає башмаки до рейок.

Сила притиснення башмака до рейки, Н,

$$K_n = \frac{\Phi_\delta^2}{\mu_0 S} = \frac{B_\delta^2 \cdot S}{\mu_0}, \quad (6.20)$$

де  $\Phi_\delta$  -магнітний потік у зазорі між башмаком і рейкою, Вб;

$B_\delta$  -магнітна індукція в зазорі, Тл;

$S$  -площа одного полюсного башмака, м<sup>2</sup>;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнітна проникність повітря в зазорі (магнітна постійна).

Сучасні конструкції рейкових електромагнітних гальм дозволяють одержати сили притиснення приблизно 50 кН на 1 м довжини башмака. За значенням сили притиснення  $K_n$  розраховують гальмівну характеристику:

$$B_{\text{п}} = \mu \cdot \varphi_{\text{п}}, \quad (6.21)$$

де  $\varphi_{\text{п}}$  -коефіцієнт тертя гальмівного башмака об рейку, що залежить від стану і матеріалу тертьових поверхонь, а також від швидкості руху.

Встановлено наступні емпіричні залежності  $\varphi_{\text{п}}$  від швидкості руху поїзда, км/год:

$$\text{при сухих рейках} \quad \varphi_{\text{п}} = 0,19 \frac{10,8V + 100}{21,6V + 100}; \quad (6.22)$$

$$\text{при мокрих рейках} \quad \varphi_{\text{п}} = 0,19 \frac{7,2V + 100}{18V + 100}. \quad (6.23)$$

Гальмівна сила поїзда, Н,

$$B = 1000 \sum K_n \varphi_{\text{п}} \quad (6.24)$$

і відповідна цій силі питома гальмівна сила поїзда, Н/кН,

$$b = 1000 \varphi_{\text{п}} \frac{\sum \mu}{mg} = 1000 \varphi_{\text{п}} \theta_{\text{п}}, \quad (6.25)$$

де  $\sum K_n$  - сумарна сила притиснення гальмівних башмаків, кН;

$\theta_{\text{мр}} = \sum K_{\text{п}} / (mg)$  - гальмівний коефіцієнт натискання гальмівних башмаків.

При гальмуванні рейковий башмак ковзає по рейці, але внаслідок нерівностей і забруднення шляху прилягає до нього не всією своєю поверхнею, через це знижується як магнітний потік, що замикається через рейки, так і сила натискання башмаків. Тому при розрахунку електромагнітної характеристики гальма, тобто залежності МРС  $F_{\text{м}}$  від індукції  $B_{\text{м}}$ , варто приймати деякий еквівалентний зазор  $\delta_{\text{э}}$ , відмінний від дійсного зазору  $\delta$ . З метою швидкого введення в дію гальм зазор повинний бути невеликий і при відсутності гальмування (порядку 10...12 мм), що пред'являє дуже високі вимоги до стану шляху. Незважаючи на цей недолік, дія рейкового гальма дуже ефективна, тому що дозволяє реалізувати високі уповільнення (приблизно 3,5...4,0 м/с<sup>2</sup>), недосяжні при інших системах гальмування.

При переміщенні магнітного поля створюваного обмоткою башмака, що рухається, у рейках наводиться ЕРС і виникають вихрові струми, що можуть створювати небезпечні зони навколо рейки. Щоб уникнути цього полярність обмоток башмаків роблять зустрічною. Вихрові струми, хоча і створюють додаткову гальмівну силу, у значно більшому ступені викликають перекручування і тим самим зменшення ефективного магнітного потоку, а отже, і зниження гальмівної сили, особливо при високих швидкостях руху. Втрати гальмівної сили від дії вихрових струмів визначають на підставі рівнянь Максвелла.

У зв'язку з різким зниженням коефіцієнта тертя  $\phi_{\text{мр}}$  гальмівного башмака об рейку при збільшенні швидкості руху (див. рис. 6.6) і відповідно різким зменшенням гальмівної сили рейкове гальмо знайшло застосування в основному як аварійне гальмо і для утримання рухомого складу на зупинці.

### 6.9. Рух поїзда при механічному гальмуванні

При колодкових гальмах гальмівна сила зменшується з ростом швидкості  $V$  швидше, ніж зростає питомий опір руху  $w_{0\text{х}}$ . Отже, при збільшенні швидкості руху гальмівна сила поїзда  $b + w_{0\text{х}}$  зменшується. Це є недоліком таких гальм, особливо при чавунних колодках, тому що при русі на спусках обумовлює механічну нестійкість процесу гальмування.

При гальмуванні на спуску діє складова ваги поїзда, спрямована у бік руху поїзда і гальмівна сила спрямована протилежно. Різниця цих сил визначає характер руху поїзда: прискорений, уповільнений чи сталий.

При гальмуванні поїзда на спуску рівняння руху має вигляд:

$$102 \frac{(1+\gamma)}{\zeta} \cdot \frac{dV}{dt} = -(b + w_{0\text{х}}) + w_{\text{г}}. \quad (6.26)$$

На рис. 6.6 приведені залежності від швидкості руху питомих сил, що входять у праву частину цього рівняння. Крива 1 характеризує зміну гальмівної сили; 2- основний опір руху; 3 – уповільнююча сила; 4-складова сили ваги. Сили опору руху і уповільнююча відкладені в позитивному напрямку, як і складова сили ваги, хоча в дійсності вони спрямовані протилежно їй.

Рівновага прикладених до поїзда сил у режимі гальмування настає при швидкості  $V_A$  (див. рис. 6.6), що відповідає  $b + w_{ox} = w_i$  і, отже,  $\frac{dV}{dt} = 0$ . При найменшому відхиленні швидкості від  $V_A$  рівновага порушується. Якщо,  $V < V_A$ , то  $(b + w_{ox}) > w_i$ , отже,  $\frac{dV}{dt} < 0$  і потяг почне рухатися уповільнено до повної зупинки. Якщо  $V > V_A$ , то  $(b + w_{ox}) < w_i$  і  $\frac{dV}{dt} > 0$ , тобто швидкість поїзда буде зростати. Умову нестійкості режиму гальмування можна представити так  $\frac{d(b + w_{ox})}{dV} < \frac{dw_i}{dV}$ , чи  $\frac{d(b + w_{ox})}{dV} < 0$ , тому що  $w_i = i$  і  $\frac{dw_i}{dV} = 0$ .

Однак ця нестійкість режиму не є перешкодою для застосування механічного гальмування на рухомому складі, тому що завдяки великій інерції поїзда механічні перехідні процеси протікають повільно і машиніст має можливість регулювати гальмівну силу для підтримки незмінної швидкості руху. Для цього машиністу приходить збільшувати натискання колодок при зростанні швидкості руху і зменшувати при її зниженні.

Лише при дуже високих швидкостях внаслідок різкого зростання основного опору руху режим механічного гальмування стає стійким. Дійсно, з рисунка 6.6 випливає, що швидкість  $V_B$  відповідає стійкому режиму руху поїзда. Тому якщо при механічному гальмуванні  $V_A < V < V_B$ , то  $(b + w_{ox}) < w_i$  і  $\frac{dV}{dt} > 0$ , тобто швидкість поїзда буде наростати в процесі гальмування до рівноважного значення  $V_B$ . Якщо  $V > V_B$ , то  $(b + w_{ox}) > w_i$ ,  $\frac{dV}{dt} < 0$ , і отже швидкість буде зменшуватися до  $V_B$ .

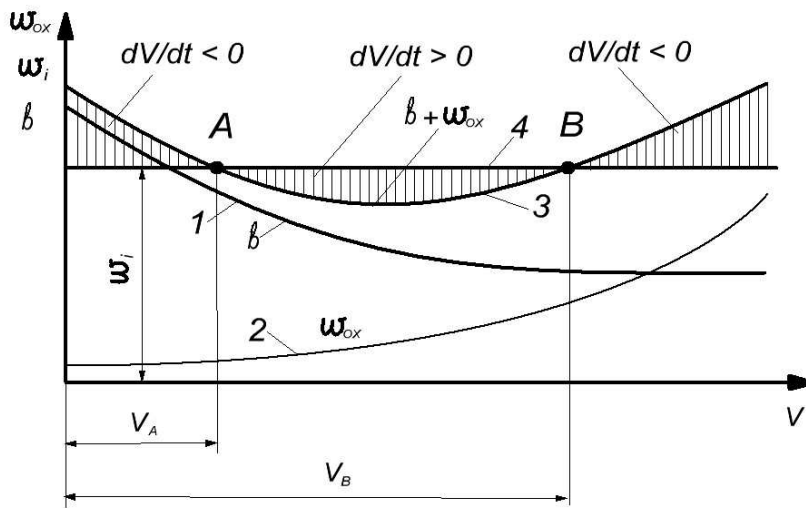


Рис.6. 6 – До визначення стійкості режиму механічного гальмування поїзда

Тому загальна умова стійкості режиму гальмування має вигляд:

$$\frac{d(b + w_{ox})}{dV} > \frac{dw_i}{dV}, \frac{d(b + w_{ox})}{dV} > 0. \quad (6.27)$$

Цей критерій стійкості справедливий при будь-якій системі гальмування, у тому числі і при електричному гальмуванні, гальмівна характеристика якого має позитивну жорсткість. Гальмівна характеристика механічно стійких систем повинна автоматично зростати при збільшенні швидкості руху.

Гальмівна характеристика механічного гальмування поїзда обмежується двома умовами: по-перше, зчепленням, що визначається граничною характеристикою при  $\sum K_n = \sum \mathcal{K}_{n \max}$ , і, по-друге, швидкістю, тому що вона не може перевищувати граничної величини  $V_{T \max}$ , що допускаються “Правилами технічної експлуатації електрорухомого складу”.

За типом приводу механічні гальма розділяються на ручні, пневматичні, електропневматичні, гідравлічні й електромагнітні. Пневматичний привід застосовується на вагонах метрополітену, деяких типах трамвайних вагонів, автомобільному та залізничному транспорті.

Електромагнітний привід застосовується на трамвайних вагонах КТМ - 5МЗ, ТЗ та ТЗМ.

У зв'язку з ростом швидкостей руху рухомий склад обладнують комбінованими системами гальмування, кожна з яких має найбільшу ефективність у визначеному діапазоні швидкостей. Одночасна дія непередбаченого сполучення систем гальмування, при якому може виникнути юз і заклинювання коліс, запобігається спеціальними пристроями.



### *Контрольні запитання:*

1. Чим відрізняється службове гальмування від екстреного?
2. Від чого залежить коефіцієнт тертя гальмівних колодок?
3. У яких типів колодок коефіцієнт тертя має максимальне значення?
4. Що називають коефіцієнтом натискання гальмівних колодок?
5. Який недолік мають дискові гальма?
6. Чим обмежена максимальна гальмівна сила механічних гальм?
7. Як формулюється закон зчеплення?
8. Які види електромагнітних рейкових гальм використовують на рухомому складі?
9. В чому полягає принцип дії електромагнітних рейкових гальм?
10. Які переваги над механічними мають магнето-рейкові гальма?
11. Які уповільнення дозволяють реалізувати механічні та магніто-рейкові гальма?
12. При яких умовах режим механічного гальмування стає стійким?
13. Як класифікуються механічні гальма за типом приводу?

## **7. ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РУХОМОГО СКЛАДУ**

### **7.1. Електрична схема тролейбуса ZiU – 9**

**Загальні відомості.** На тролейбусі ZiU-9 встановлено тяговий електродвигун ДК-210А-3 потужністю 110 кВт. Він має змішане збудження з перевагою магнітного поля послідовної обмотки збудження.

Виводяться ступіні пускового реостата і ступіні регульовального реостата ослаблення збудження послідовної обмотки за допомогою групового реостатного контролера ЕКГ-20Б. Реостатний контролер має 12 силових кулачкових контакторів КЭ-52 (КЭ-61), 8 кулачкових контакторів КЭ-42, включених у коло керування, і один перемикаючий кулачковий контактор КЭ-54 з контактами РКМ, що замикаються між позиціями, і РКП, які замикаються на позиціях. Реостатний контролер має 18 позицій і серводвигуновий привід із двома обмотками збудження: одна обмотка працює при пуску «Вперед», інша при поверненні вала реостатного контролера на перше положення «Назад».

В електричній схемі робота силових контакторів передбачається тільки на замикання, тому силові контактори виконані без дугогасіння. При електричному реостатному гальмуванні тролейбуса реостатний контролер не використовується. Для гасіння енергії при електричному реостатному гальмуванні використовують окремий резистор, тому реостатне гальмування можна здійснювати, не очікуючи повернення реостатного контролера на першу позицію. Цей резистор застосовують також на початку пуску для зниження

обертаючого моменту вала якоря тягового електродвигуна при виборі люфтів у механічній передачі.

Силове коло при тяговому і гальмовому режимах тягового двигуна включається п'ятьма контакторами КПП-113. Переключення в паралельній обмотці збудження тягового двигуна виконуються контакторами КПД-110.

Автоматичний пуск тролейбуса здійснюється під контролем реле прискорення Р-52Б, що має три котушки: основну, включену в коло якоря тягового двигуна, регульовальну і піднімальну, які включені в коло керування.

Режим роботи тролейбуса задається за допомогою контролера керування КВП-22Б, що має нульове, маневрове і три ходові положення. Електричні кола тролейбуса дозволяють здійснювати наступні режими роботи: рух при маневровому положенні, нормальний автоматичний розгін, рух з різними швидкостями, реверсування, електричне гальмування з регулюванням гальмового зусилля. Вихід на будь-яку фіксовану позицію, задану контролером керування, відбувається під контролем реле прискорення.

Водій залежно від умов руху має можливість виконувати автоматичний пуск тролейбуса з різним прискоренням.

**Підготовка тролейбуса до пуску.** Принципова схема тягового електроприводу тролейбуса ЗіУ – 9 і схема кіл керування приведені на рис. 7.1 – 7.2. Перед приведенням схеми в робочий стан включають акумуляторну батарею вимикачем А2, коло керування — вимикачем ВУ1 і при натиснутій кнопці ПС1 перевіряють порядок включення контакторів (секвенцію) і роботу електропривода реостатного контролера. Далі виконують наступні операції для підготовки схеми до роботи: встановлюють струмоприймачі Т1 і Т2 на контактні проводи, вимикачами ВВЦ1 і ВВЦ2 включають коло допоміжного двигуна ДВ, при цьому реле нульове, спрацювавши, замкне контакт РН у колі котушок лінійних контакторів ЛК1 і ЛК2 і розімкне контакт РН у колі дзвоника ЗОТ; вимикачем ВУ2 включають коло звукової сигналізації відсутності напруги в контактній мережі (ЗОТ); вимикачами ВУК і ВВЦ3 включають коло двигуна компресора ДК і вимикачем А1 — коло електропривода підсилювача руля. Після наповнення компресором пневмосистеми повітрям установлюють рукоятку реверсора в положення, що відповідає наміченому напрямку руху («Вперед» або «Назад»).

При необхідності включають електропечі салону і кабіни вимикачами В8, В28 і ВВЦ4; а у вечірній час — освітлення салону, підніжки, габаритні і маршрутні показники.

Потім включають автоматичний вимикач АВ і тролейбус готовий до руху.

Пуск і автоматичний розгін двигуна здійснюють натисканням ходової педалі контролера керування з установкою її на будь-яке положення, що характеризує кінцеву швидкість руху тролейбуса. При установці ходової педалі на маневрове положення реостатний контролер залишається на 1-й позиції. У колі керування замикаються кулачкові контактори контролера ходу КВМ-3 у проводах 5-7, КВМ-3 у проводах 11-12 і КВМ-1 у проводах 5-26. По колу:

плавкий запобіжник Пр2 - вимикач керування ВУ1 - провід 5 - кулачковий контактор реостатного контролера РК1 - провід 11 - КВМ-3 - провід 12 - кулачковий контактор гальмового контролера ТК0 — провід 13 - контакт контактора Т - провід 14 - контакт реле перевантаження РТ - провід 15 - замикаючий контакт реле нульового РН - провід 16 одержують живлення котушки лінійних контакторів ЛК1 і ЛК2. Одночасно по колу провід 12 - кулачковий контактор РК1-13 - провід 18 одержує живлення котушка контактора Ш1. І по колу кулачковий контактор КВМ-1 - провід 26 струм йде в регульовальну котушку реле прискорення РУ2.

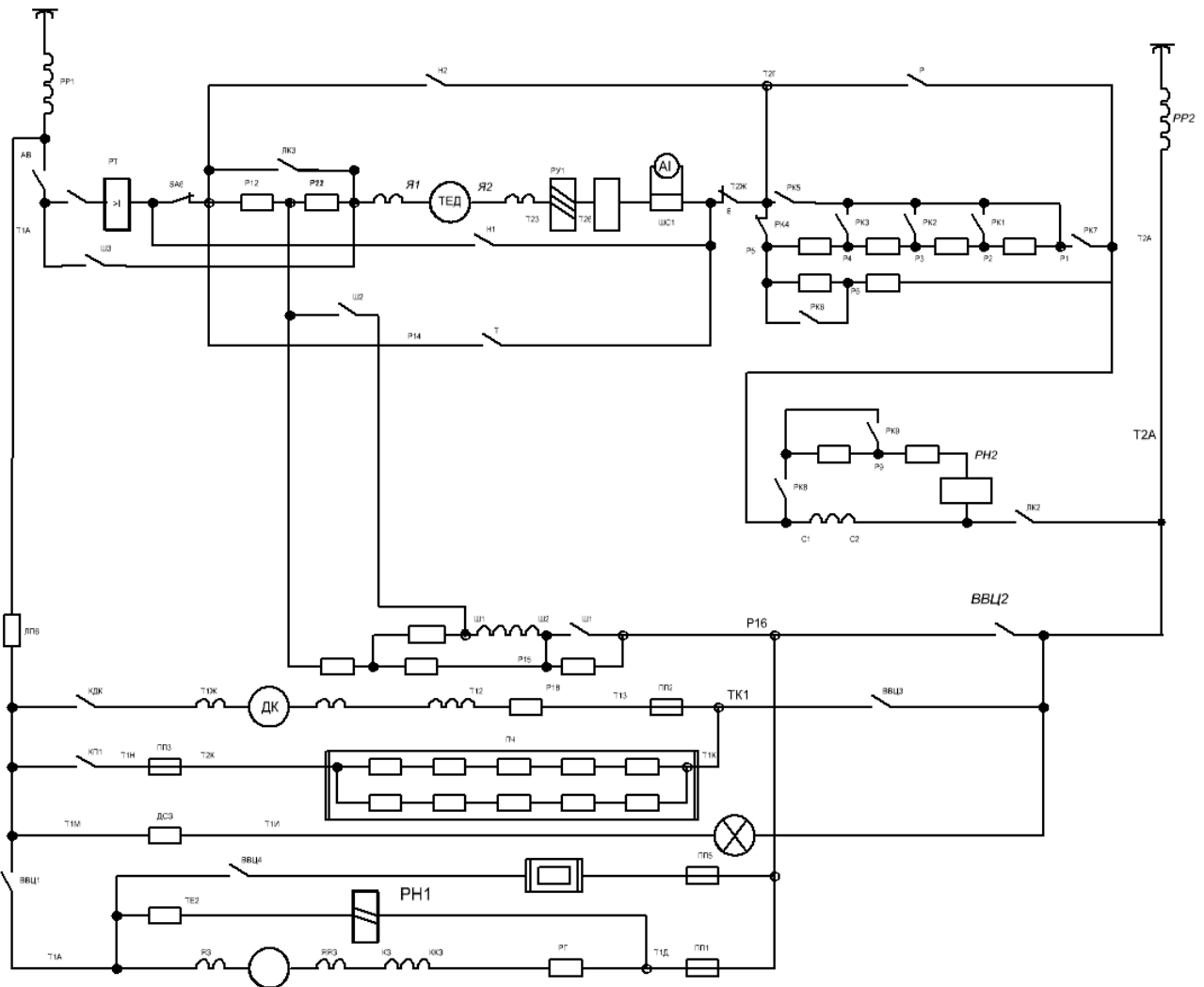


Рис. 7.1 – Принципова схема тягового електроприводу тролейбуса ЗиУ - 9

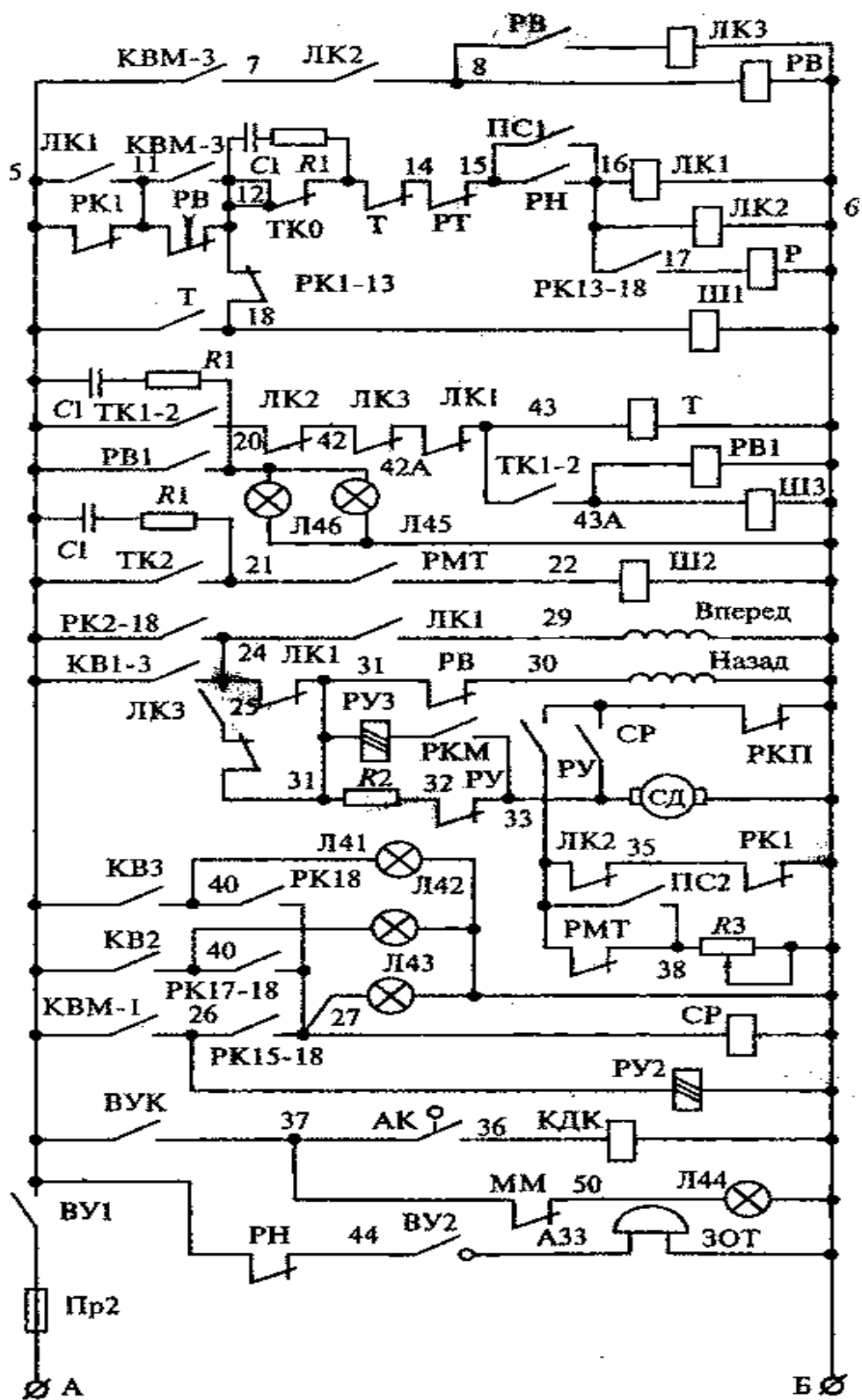


Рис. 7.2 – Принципова схема кіл керування тролейбуса ЗіУ - 9

При включенні лінійних контакторів ЛК1 і ЛК2 у силовому колі струм йде: від струмоприймача Т1 через реактор поміхоперешкоджання РР1, автоматичний вимикач АВ, силові контакти контактора ЛК1, котушку реле перевантаження РТ, контакти реверсора В1, гальмовий реостат Р12-Р13-Р21, обмотку збудження додаткових полюсів і якір тягового двигуна ТД, силову котушку реле прискорення РУ1, котушку реле мінімального струму РМТ, шунт ШС1 амперметра А, контакти реверсора В2, силові контакти реостатного контролера РК7, пусковий реостат Р2-Р1-Р3-Р4-Р5-Р6-Р7-Р10, обмотку послідовного збудження тягового двигуна С11-С21, силові контакти контактора ЛК2, реактор РР2 і струмоприймач Т2.

Струм паралельною обмоткою збудження тягового двигуна йде: від струмоприймача Т1 (по раніше розглянутому колі РР1-АВ-ЛК1-РТ-В1-Р12-Р13), далі через регулювальний реостат Р13-Р14, обмотку рівнобіжного збудження Ш11-Ш21, контакти контактора Ш1, вимикач ВВЦ2, реактор РР2 і потім через струмоприймач Т2. Одночасно струм йде через розрядний резистор Р14-Р15, підключений паралельно обмотці збудження Ш11-Ш21. У колі якоря тягового двигуна буде невеликий струм (опір реостата складає 6,482 Ом) і двигун створює обертаючий момент на валу порядку 220-230 Нм, достатній для вибору люфтів у механічній передачі, але нездатний зрушити тролейбус з місця.

Одночасно з включенням контакторів ЛК1 і ЛК2 замикаються їхні блокувальні контакти: ЛК1 у проводах 5-11 шунтується кулачковий контактор РК1, а ЛК2 у проводах 7-8 замикає коло живлення котушки реле часу РВ і подається живлення на схему керування тиристором Т1. Через 0,3 секунди тиристор відкривається і шунтує частину гальмівного реостата.

Реле часу має мідний або алюмінієвий демпфер (циліндр), установлений на його магнітопроводі. Внаслідок того, що при замиканні кола котушки реле в демпфері будуть наводитись вихрові струми, вони будуть перешкоджати швидкому збільшенню магнітного потоку і якір буде притягатися до осердя не відразу після включення котушки реле, а через якийсь час. Після відключення котушки в демпфері протягом деякого часу також буде циркулювати струм, що наводиться магнітним потоком і перешкоджає зменшенню магнітного потоку реле. Тому якір буде відпадати від осердя також з деякою затримкою часу.

Після проходження струму по котушці реле часу через 0,6-0,7 с контакти реле часу РВ у проводах 8-9 замикаються і включають котушку контактора ЛК3. Лінійний контактор ЛК3 включається і виводить з кола якоря тягового двигуна гальмовий реостат Р12-Р13-Р21 цілком. У такий спосіб у модернізованій схемі наростання пускового моменту відбувається двома ступіннями, що сприяє плавному вибору люфтів у механічній передачі тролейбуса.

Опір реостата, включеного в силовий коло, знизиться до 4,612 Ом і обертаючий момент тягового двигуна буде достатнім для маневрової роботи тролейбуса. Маневрова позиція контролера ходу призначена для роботи тролейбуса в місцях зосередження транспорту при русі зі швидкістю 8-10 км/г.

При установці пускової педалі на (Х1) перше ходове положення замикається контактор КВ1-3 у проводах 5-24 і включає коло серводвигуна СД. Якір серводвигуна одержує живлення по колі: провід 5 - КВ1-3- провід 24 - блок-контакт контактора ЛК3 - контакт, що розмикає, реле СР - провід 31 - резистор R2 - провід 32 - контакт, що розмикає - реле прискорення РУ - провід 33. Обмотка збудження серводвигуна «Вперед» одержує живлення по колі: КВ1-3 – провід 24 -блок-контакт контактора ЛК1 - провід 29.

Серводвигун через редуктор повертає вал реостатного контролера на 2-у, 3-ю і наступні позиції, поступово виводячи пусковий реостат з кола тягового двигуна. При цьому напруга на тяговому двигуні і швидкість руху тролейбуса збільшуються.

На 2-й позиції замикається силовий кулачковий контактор реостатного контролера РК1 і з кола тягового двигуна виводиться ступінь Р1-Р3, опір пускового реостата зменшується до 3,382 Ом. З 3-ї до 7-ї позиції по черзі замикаються кулачкові контактори РК2, РК3, РК4, РК5, РК8 і відповідно виводять ступіні Р3-Р4, Р4-Р5, Р5-Р6, Р6-Р7, Р2-Р1. Опір реостата знижується при цьому відповідно значенням 2,55; 1,912; 1,572; 1,232; 0,924 Ом. На 8-й позиції реостатного контролера кулачковий контактор РК7 розмикається, а РК9 замикається, включаючи паралельно ступіні Р7-Р10 і Р7-Р1. Опір реостата зменшується до 0,725 Ом.

З 9-ї до 11-ї позицію реостатного контролера по черзі замикаються кулачкові контактори РК2, РК3, РК4 і шунтують відповідно ступіні Р4-Р1, Р5-Р1, Р6-Р1. Опір реостата буде відповідно 0,543; 0,391; 0,248 Ом. На 12-й позиції знову замикається кулачковий контактор РК7, підключаючи паралельно ступінь Р2-Р1. Струм через пусковий реостат йде за трьома рівнобіжними галузями і опір реостата складає 0,138 Ом. На 13-й позиції в колі керування замикається кулачковий контактор реостатного контролера РК13-18 у проводах 16-17 і включає коло котушки лінійного контактора Р. При включенні лінійного контактора Р пусковий реостат цілком виводиться із силового кола відповідно таблиці включення контакторів і тяговий двигун починає працювати за автоматичною характеристикою з повним збудженням.

На 14-й позиції розмикається кулачковий контактор реостатного контролера РК1-13 у проводах 12-18 кола керування і відключає котушку контактора Ш1. При цьому в коло рівнобіжної обмотки збудження тягового двигуна вводиться резистор Р15-Р16 з опором 400 Ом і струм у цьому колі знижується з 1,67 до 0,3 А, створюється перший ступінь ослаблення поля тягового двигуна, внаслідок чого швидкість руху тролейбуса збільшується.

На 15-й позиції реостатного контролера замикається силовий кулачковий контактор РК10, підключаючи паралельно послідовній обмотці збудження С11-С21 регульовальний реостат Р19-Р20А і послідовно включену з ним котушку реле напруги РН2. Відбувається ослаблення поля послідовної обмотки тягового двигуна на 28%.

П'ятнадцята позиція реостатного контролера є першою фіксованою ходовою позицією, що відповідає 1-му ходовому положенню педалі контролера

керування. При підході кулачкового вала реостатного контролера до цієї позиції замикається кулачковий контактор РК15-18 у проводах 26-27 кола керування і включає котушку реле СР. Контакти реле СР у проводах 25-31 відключають живлення якоря серводвигуна СД, а друга пара його контактів у проводах 33-34 закривається, утворивши гальмовий контур для якоря серводвигуна через замкнутий на позиціях перемикаючий кулачковий контактор реостатного контролера РКП. Серводвигун, замкнутий накоротко, зупиниться, фіксуючи кулачковий вал реостатного контролера на 15-й позиції.

Для збільшення швидкості тролейбуса варто установити пускову педаль на інші ходові положення.

На 2-му ходовому положенні педалі замикається кулачковий контактор KB2 контролери ходу в проводах 5-41 кола керування і розмикається контактор KBM-1 у проводах 5-26, розриваючи коло живлення котушки реле СР. Контакти реле СР у проводах 33-34 розмикаються, а контакти СР у проводах 25-31 замикаються, включаючи живлення якоря серводвигуна, і вал реостатного контролера повернеться на 16-ю і 17-ю позиції. На цих позиціях спочатку замикається силовий кулачковий контактор РК6, а потім РК11, виводячи з регулювального реостата резистори P22A-P22, потім P22-P20. Відбувається ослаблення поля тягового двигуна спочатку на 47%, а потім на 60%. На 17-й позиції замикається кулачковий контактор РК17-18 у проводах 41-27 кола керування і включається коло живлення котушки реле СР. Ця фіксована позиція реостатного контролера відповідає 2-му ходовому положенню педалі.

При установці пускової педалі на 3-тє ходове положення замикається кулачковий контактор KB3 у проводах 5-40 кола керування і розмикається кулачковий контактор KB2 у проводах 5-41, відключаючи живлення котушки реле СР. Контакти СР у проводах 25-31 знову замикаються і вал реостатного контролера повертається на 18-ю позицію.

На 18-й позиції замикається силовий кулачковий контактор РК12, шунтуючи ступіні P19-P22A-P22-P20 регулювального реостата. Відбувається ослаблення послідовного збудження двигуна на 69%. Ця позиція відповідає 3-му ходовому положенню педалі. Кулачковий контактор РК18 у проводах 40-27 кола керування включає котушку реле СР і вал реостатного контролера зупиняється.

Частоту обертання вала реостатного контролера регулює реле прискорення. На 1-му ходовому положенні реле прискорення підтримує мінімальне значення струму в тяговому двигуні близько 150-170 А, через того що на цьому положенні відповідно до силової котушки реле прискорення РУ1 діє регулювальна котушка РУ2, створюючи додатковий магнітний потік і сприяючи утриманню якоря реле прискорення в притягнутому стані при відносно невеликому струмі двигуна.

При повороті вала реостатного контролера в проміжках між позиціями паралельно резисторові R2 перемикаючими контактами РКМ включається піднімальна котушка реле прискорення РУ3.

З виводом пускового реостата струм у колі тягового двигуна, а виходить, у силовій котушці РУ1 збільшується. Якщо струм перевищить уставку реле прискорення, то при загальній дії сил котушок, що намагнічують, РУ1, РУ2 і РУ3 якір реле притягнеться до сердечника, контакти РУ в проводах 32-33 розімкнуться і відключать живлення якоря серводвигуна, а контакти РУ в проводах 33-34 замкнуться і через контакти кулачкового контактора РКП, що включаються тільки на позиціях, замкнуть якір серводвигуна накоротко. Тому що обмотка збудження серводвигуна «Вперед» продовжує одержувати живлення, то серводвигун переходить у гальмовий режим і швидко зупиняється, фіксуючи вал реостатного контролера на позиції. На фіксованій позиції котушка РУ3 не одержує живлення (контакт РКМ розімкнуто), а якір реле прискорення утримується у включеному стані магнітним потоком котушок РУ1 і РУ2. При збільшенні швидкості тролейбуса струм тягового двигуна знижується і стає менше струму уставки реле прискорення, якір реле під дією пружини відходить від магнітопроводу і контакти РУ в проводах 32-33 знову замикаються і включають серводвигун. Вал реостатного контролера обертається на наступну позицію, виводячи наступну ступінь пускового реостата.

Залежно від умов руху, числа пасажирів у салоні і стану дорожнього покриття пуск тролейбуса можна здійснювати з різним прискоренням. Найменше прискорення на 1-му ходовому положенні, на якому включена регульовальна котушка реле прискорення РУ2, і пуск здійснюються при струмі 150- 170 А. Якщо після маневрового положення перевести ходову педаль на 2-е чи 3-є ходове положення, минаючи 1-е, кулачковий контактор КВМ-1 у проводах 5-26 кола керування розімкнеться і відключить регульовальну котушку реле прискорення РУ2. Струм регулювання реле прискорення стає 250-280 А. При цьому пуск тролейбуса буде відбуватися з великим прискоренням.

Найбільша припустима швидкість тролейбуса з нормальним навантаженням на горизонтальній ділянці дороги - 68 км/г. Середнє прискорення при нормальному навантаженні і напрузі в контактній мережі 550 В на горизонтальній площадці при розгоні складає  $1,3 \text{ м/с}^2$ .

**Відключення ТЕД і вибіг.** При опусканні ходової педалі в нульове положення виключаються всі кулачкові контактори КВ контролера ходу. Спочатку знімається напруга з котушки контактора ЛК3 і котушки реле часу РВ. При вимиканні контактора ЛК3 у коло якоря тягового двигуна вводиться гальмовий реостат Р12-Р13-Р21. Через 0,5-0,7 с після відключення контактора ЛК3 контактами реле часу РВ у проводах 11-12 кола керування виключаються котушки контакторів ЛК1, ЛК2, Р і контактори ЛК1 і ЛК2 відключають силовий коло. Таким чином, перед відключенням тягового двигуна від контактної мережі попередньо вводиться резистор, що знижує струм. При цьому полегшується гасіння дуги на контактах контакторів ЛК1 і ЛК2 і забезпечується більш плавний перехід з тяги на вибіг. Це особливо важливо при



переході на вибіг під час пуску тролейбуса, якщо прискорення міняється від максимального до деяких негативних значень, обумовлених опором руху.

Після вимикання контакторів ЛК1 і ЛК2 блокувальні контакти ЛК1 у проводах 24-29 кола керування розривають коло живлення обмотки збудження серводвигуна «Вперед», а блокувальні контакти ЛК1 у проводах 24-31 замикають коло живлення обмотки збудження серводвигуна «Назад». Якір серводвигуна одержує живлення по колі: провід 5 - кулачковий контактор РК2-18 - провід 24 - блокувальні контакти, що розмикають, ЛК1 - провід 31 - резистор R2 - провід 32 - контакти РУ - провід 33. Обмотка збудження серводвигуна «Назад» одержує живлення по колу: провід 5 - РК2-18 - провід 24 - блокувальні контакти ЛК1 - провід 31 - контакти реле часу РВ - провід 30. Вал реостатного контролера повертається на 1-у позицію. Якщо вал реостатного контролера підходить до 1-ої позиції, розмикаються контакти кулачкового контактора РК2-18 у проводах 5-24, що відключають живлення якоря й обмотки збудження «Назад» серводвигуна. Замикається кулачковий контактор РК1 у проводах 35-6 і якір серводвигуна замикаються на коротко через блокльні контакти ЛК2 у проводах 33-35 і контакти РК1. Вал реостатного контролера фіксується на 1-й позиції.

При поверненні вала реостатного контролера на 1-у позицію якір серводвигуна не шунтується резистором R3, тому що контакти реле мінімального струму РМТ у проводах 33-38 розімкнуті. Тому частота обертання вала реостатного контролера назад вище, ніж при пуску тролейбуса з зупинки, тобто забезпечується прискорене повернення вала реостатного контролера на вихідне положення.

**Електричне гальмування.** Під час електричного гальмування тяговий двигун працює в генераторному режимі, а вироблена їм електроенергія гаситься в гальмовому реостаті. Електрична схема тролейбуса передбачає дві позиції службового реостатного гальмування.

Після установки гальмової педалі контролера керування на 1-е положення розмикається кулачковий контактор ТКО і замикається кулачковий контактор ТК1-2. Якщо гальмування створюється після вибігу, то розмикання контактів кулачкового контактора ТКО в проводах 12-13 кола керування не вносить в електричну схему ніяких змін. Якщо ж гальмова педаль була натиснута при ходовому режимі, то розмикання контактів кулачкового контактора ТКО приведе до відключення лінійних контакторів ЛК1, ЛК2 і Р. У результаті силове коло тягового двигуна відключається від контактної мережі і вал реостатного контролера повертається на 1-у позицію.

Контакти кулачкового контактора ТК1-2 у проводах 5-20 кола керування включають живлення котушок контакторів Т, ШЗ і реле часу РВ1. Живлення на котушку контактора Т надходить через контакти ТК1-2 у проводах 5-20 через контакти контакторів ЛК2, ЛК3, ЛК1 і провід 43, а на котушки контактора ШЗ і реле часу РВ1 живлення надходить через контакти

кулачкового контактора ТК1-2 у проводах 43А-43. Одночасно в проводах 20-6 включаються лампи стоп-сигналу Л45 і Л46.

При включенні контактор Т силовими контактами замикає коло якоря тягового двигуна на гальмовий реостат Р12 - Р13 - Р21, а контактами Т в проводах 5-18 кола керування включає живлення котушки контактора Ш1. Струм у рівнобіжну обмотку збудження тягового двигуна йде по наступному колі: струмоприймач Т1 - реактор РР1 - автоматичний вимикач АВ - контакти контактора Ш3 - резистори Р21 - Р13 - Р14 - обмотка збудження Ш11 - Ш21 і паралельно включений їй розрядний резистор Р14 - Р15 - резистор Р15- Р16 - вимикач ВВЦ2 - реактор РР2 - струмоприймач Т2. Включенням контактора Ш1 виводиться резистор Р15 - Р16, що приводить до збільшення струму збудження і гальмового струму. Якір тягового двигуна обертається під дією механічної енергії, запасеною тролейбусом при русі. Обмотка якоря перетинає магнітне поле, що створюється рівнобіжною і послідовною обмотками збудження двигуна, і в ній наводиться Е.Р.С. Двигун переходить у генераторний режим і відбувається гальмування тролейбуса.

Схема електричних колів тролейбуса забезпечує залежність магнітного поля або збудження від струму в гальмовому контурі, тому що струм обмотки збудження проходить через стабілізуючий резистор Р12-Р13. Зі збільшенням гальмівного струму збільшується падіння напруги на цьому резисторі і зменшується струм у паралельній обмотці збудження Ш11— Ш21. Зменшення гальмівного струму викликає збільшення збудження, тобто виходить така ж залежність, як у генератора зустрічно-змішаного збудження.

При установці гальмівної педалі на 2-е положення замикаються контакти кулачкового контактора ТК2 у проводах 5-21 кола керування і через замкнутий контакт реле мінімального струму РМТ у проводах 21-22 подається живлення на котушку контактора Ш2. Включенням контактора Ш2 виводиться резистор Р13-Р14 з кола збудження, що збільшує струм збудження і, виходить, гальмовий струм і гальмову силу. Електричне реостатне гальмування при серійній електричній схемі дозволяло знизити швидкість тролейбуса до 10-12 км/г.

При більш глибокому натисканні гальмівної педалі на реостатне гальмо накладається механічне гальмо, що має пневматичний привод.

Після встановлення гальмової педалі в нульове положення кулачкові контактори ТК1-2 і ТК2 розмикаються, а ТКО замикається. Спочатку знімається напруга з котушок контакторів Ш2 і Ш3 і котушки реле часу РВ1. Контактор Ш3 виключається і відключає коло рівнобіжної обмотки збудження. Магнітне поле тягового двигуна зникає. Через 0,5-0,7с після вимикання котушки реле часу РВ1 розмикаються контакти реле часу РВ1 у проводах 5-20, що шунтують контакти кулачкового контактора ТК1-2, після чого знімається напруга з котушки контактора Т. Таким чином, контактор Т розриває вже знеструмлений гальмівний контур силового кола.

## **7.2. Електрична схема тягового електроприводу тролейбуса 14 ТР**

Електрична схема даного тролейбуса дозволяє здійснити наступні режими роботи: плавний безреостатний пуск, автоматичний плавний перехід на характеристику з ослабленим магнітним полем ( зменшеним на 60%), реостатне гальмування та зміну напрямку руху.

Електричні кола тролейбуса 14Тр напругою 600 В (Рис. 7.3) включають наступні елементи: тяговий електродвигун послідовного збудження МЗ потужністю 100 кВт при номінальній напрузі 600 В; електродвигун М1 послідовного збудження потужністю 2 кВт при напрузі 600В для компресора; електродвигун М2 послідовного збудження потужністю 2 кВт при напрузі 600В для генератора і гідронасосу; автоматичний вимикач 2НА1 із струмом уставки 380 А, допоміжними контактами на номінальну напругу 220 В і струм 10 А; контактори на номінальні струми 200 і 40 А (К1, К3, К4, К5, К6, К7, К8, К10, К17); контролер управління 1КТДЗ; перемикач напрямку руху 1РРД21 (Q1); гальмівні (RM3.1) і шунтуючі (R1, R2, R3) резистори; силовий блок, що складається з допоміжного (V16) і головних (V17 і V18 )тиристорів, комутуючого конденсатора С12, перезарядних діодів (V15 і V19), гальмівного нульового діода V21, антиколивального діода V22, випрямного моста V11— V14, діода V21, дроселів L3 і L4 і індуктивностей L1 і L5, резисторів R1 і R2, а також не показаних на схемі діодного дільника VI –V10 і RC-кіл; згладжуючу конденсаторну батарею С2; дросель ТМ4 і перешкодоподавляюча ланка LC1.3; опалювальні елементи (Е1 — Е4); струмоприймачі W1 і W2; розрядник F1.

**Підготовка схеми до пуску.** Для пуску схеми необхідно поставити струмоприймачі W1 і W2 на контактні дроти, включити автоматичний вимикач Q1 і вимикач акумуляторів, закрити всі двері, включити перемикач сигналізації втрати напруги в положення «Включено» і вимикач сигналізації втрати тиску в положення «Включено». Після наповнення стислим повітрям пневматичної системи схема готова до пуску.

**Автоматичний пуск ТЕД.** При натисненні пускової педалі контролера включаються контактор 1К5 і допоміжний тиристор V16. Контакт 1К5 включається раніше від допоміжних контактів автоматичного вимикача 2НА1. З включенням вказаних елементів збирається коло живлення тягового електродвигуна: плюс контактної мережі - струмоприймач W1 - L3 – L1 - контакти контактора 1К5 - діод моста V11 - ТМ4 - послідовна обмотка ТЕД - розрядник F1 - діоди V22 і V20 - комутуюча конденсаторна батарея С12- тиристор V16 - діод моста V12 - 2НА1 – L2 – L4 - W2 - мінус контактної мережі. Як тільки С12 зарядиться до напруги мережі, тиристор V16 закриється, але двигун отримуватиме живлення за рахунок запасеною енергії в ТМ4 і обмотках ТЕД через діод V21.

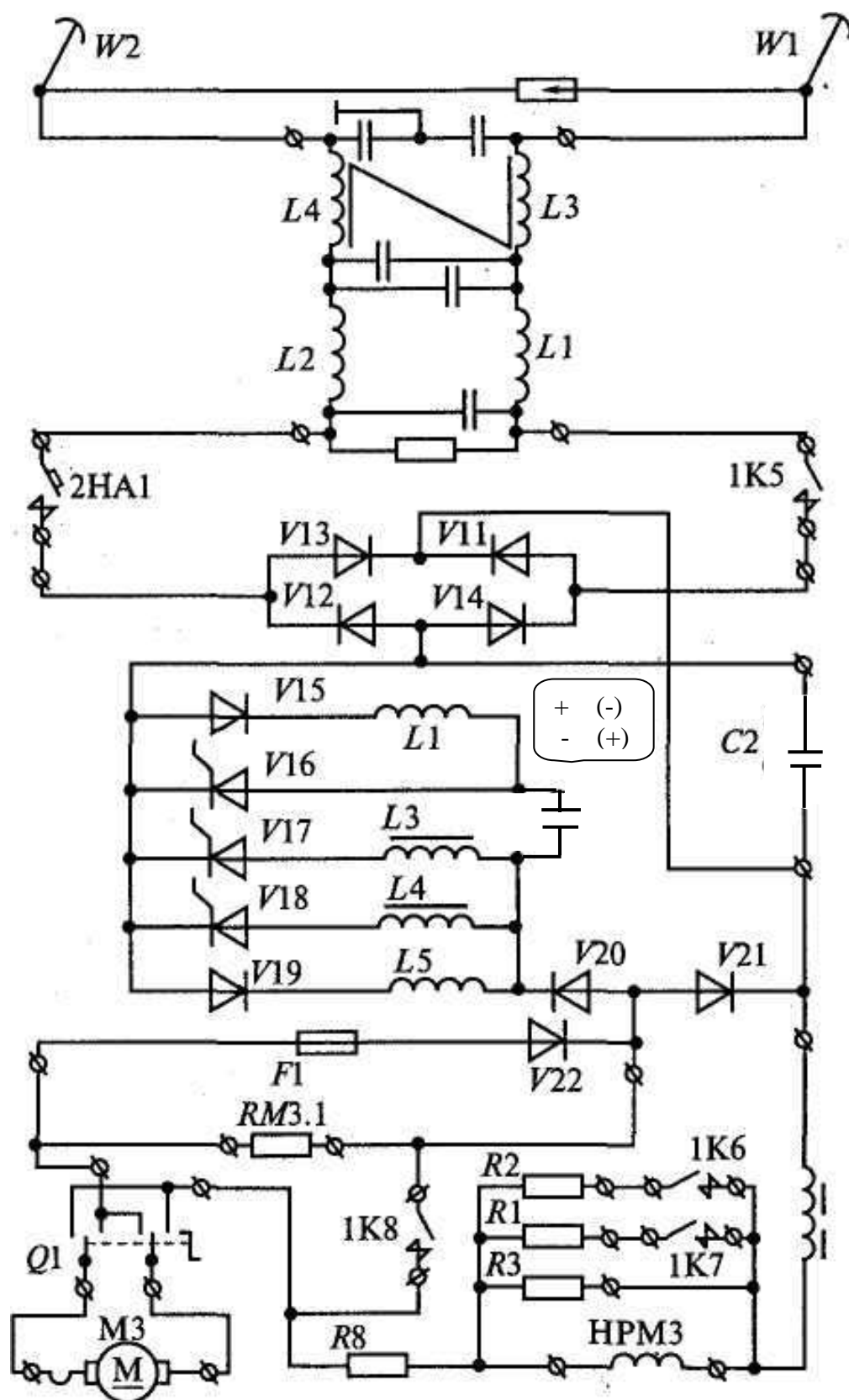
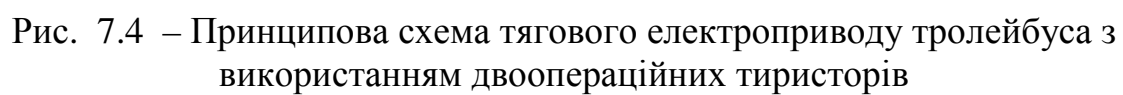


Рис. 7.3 – Принципова схема тягового электроприводу тролейбуса 14 TP



Після відключення допоміжного тиристора V16 включаються головні тиристори V17 і V18 і знову утворюється коло живлення ТЕД: плюс контактної мережі - 1K5 - V11 - TM4 – НРМ3 – М3 - V22 - V20 - V17 і V18-V12 - 2НА1– L2 – L4 - W2 - мінус контактної мережі. Одночасно відбувається перезаряд комутуючого конденсатора C12 на зворотну полярність, вказану в дужках. Контур перезаряду: C12 - V17 і V18 - V15 - C12. Потім знову включається допоміжний тиристор V16 і зворотна напруга конденсатора C12 прикладається до головних тиристорів V17 і V18. Останні внаслідок цього закриваються, а конденсатори C12 заряджають через V19 з полярністю, вказаною без дужок. Далі процес повторюється.

При подальшому наборі швидкості автоматично включаються контактори K6 і K7, які паралельно обмотці збудження ТЕД підключають резистори R1 та R2. Струм в обмотці збудження зменшується і швидкість обертання якоря ТЕД зростає.

**Електричне реостатне гальмування.** При електродинамічному гальмуванні обмотка збудження живиться від контактної мережі. Коло якоря підключається до постійного гальмівного резистора RM3.1. Тяговий електродвигун переводиться в режим генератора, при цьому в якорі виробляється енергія, яка витрачається на нагрів гальмівного резистора. В результаті цього виникає гальмівний момент. Максимальний гальмівний момент досягається при 50 %-му натисненні на гальмівну педаль. При швидкості 10...15 км/г натиснення на гальмо можна продовжити. При цьому на електричне гальмування накладається гальмування механічними гальмами колодок з пневматичним приводом.

Схема при електричному гальмуванні діє таким чином.

При натисненні на гальмівну педаль спочатку включається контактор K8, а потім K5. Контактор K8 при цьому збирає замкнутий контур якоря ТЕД через гальмівний резистор (М3 - 1K8 - RM3.1 - М3). Контактор K5 підключає обмотку збудження НРМ3 через регулятор напруги до контактної мережі: плюс контактної мережі - W1 - 1K5 - V11 - TM4 – НРМ3 - 1K8 - V20 - V16 - V12 – F2 - W2 - мінус контактної мережі).

На сучасному рухомому складі МЕТ застосовують силові схеми з використанням імпульсних перетворювачів на базі одно- та двоопераційних тиристорів а також транзисторів з ізольованим затвором (IGBT транзистори).

На рис. 7.4 надана силова схема тролейбуса з використанням двоопераційних тиристорів на якій прийняті наступні позначення:

QF1, QF2 – автоматичні вимикачі в загальному колі та колі якоря ТЕД;

Q1.1 - Q1.4 – перемикач полярності контактної мережі з ручним приводом;

K1, K4 – електромагнітні контактори для підключення якірної обмотки ТЕД послідовно з обмоткою збудження та до контактної мережі в режимі пуску тролейбуса;

K2 – гальмівний контактор;

КЗ – при включенні разом з контактором К2 виконує реверсування тролейбуса по колу якоря ТЕД;  
 LF, CF – відповідно індуктивність і ємність вхідного фільтру;  
 VS3 – двоопераційний тиристор для регулювання напруги на ТЕД;  
 VS4 – двоопераційний тиристор для ослаблення поля ТЕД;  
 VS5 – одноопераційний тиристор, який відкривається за командою системи керування для виконання рекуперативного гальмування при невеликих швидкостях руху;  
 VS2 – одноопераційний тиристор для виконання реостатного гальмування, який відкривається за командою системи керування при значному підвищенні напруги в контактній мережі в режимі рекуперації;  
 VS1 – одноопераційний тиристор, який відкривається за командою системи керування для виконання рекуперативного гальмування;  
 VD2 – нульовий діод;  
 R 4 – гальмівний опір;  
 М 1 – якірна обмотка ТЕД;  
 М1.1 – послідовна обмотка ТЕД;  
 R 5 – додатковий резистор, який підключається послідовно з якірною обмоткою ТЕД для виконання рекуперативного гальмування при великих швидкостях руху;  
 ДСМ, ДНМ – датчики струму та напруги контактної мережі;  
 ДСЯ, ДСЗ – датчики струму якоря та обмотки збудження ТЕД.

При використанні двоопераційних тиристорів силові схеми рухомого складу мають наступні переваги:

- зменшується кількість силових напівпровідникових елементів та за рахунок цього на 15% зменшується вага імпульсного перетворювача (особливо за рахунок видалення зі схеми комутуючих конденсаторів та підвищення робочої частоти перетворювача);
- забезпечується можливість реостатного гальмування без обмежень, які вносяться спеціальними частинами контактної мережі (ця перевага забезпечується за рахунок відокремлення силової схеми від контактної мережі за рахунок тиристора VS 1 та діоду VD1);
- розширюється діапазон напруг при якому можлива нормальна робота статичного перетворювача за рахунок відсутності схеми зарядки комутаційних конденсаторів;
- виникає можливість підключення низьковольтного джерела живлення автономного ходу тролейбуса, що значно підвищує мобільність роботи, особливо при обривах контактної мережі;
- зменшується зношування контактів лінійних контакторів за рахунок їх безструмового включення та відключення;
- зменшується витрати електроенергії на тягу в порівнянні з реостатними системами керування ТЕД;

- з'являється можливість використання рекуперативно–реостатного гальмування практично до зупинки;
- при використанні мікропроцесорної системи керування з'являються додаткові можливості забезпечення безпеки руху ( можливість завдання максимальної швидкості руху, зміна уставки максимального струму при розгоні, блокування пуску тролейбуса при відчинених дверях ).
- зменшується витрати електроенергії на реалізацію схем ослаблення поля послідовної обмотки ТЕД;
- спрощуються схеми реверсування ТЕД.

В якості недоліків наведеної схеми необхідно відмітити той факт, що значно ускладнюється схема керування двоопераційним тиристором, так як для його закриття через керуючий електрод необхідно пропускати струм, який по значенню повинен дорівнювати струму якоря ТЕД а також більше падіння напруги на ньому у відкритому стані. Але ці недоліки компенсуються значними перевагами силових схем рухомого складу.

#### *Контрольні запитання:*

1. *Яке збудження має тяговий електродвигун ДК-210А-3??*
2. *Скільки позицій має реостатний контролер тролейбуса ЗіУ-9?*
3. *Як працює реостатний контролер тролейбуса ЗіУ-9 при реостатному гальмуванні?*
4. *Як працює реле прискорення тролейбуса ЗіУ-9?*
5. *Яке призначення має реле напруги тролейбуса ЗіУ-9?*
6. *Яке призначення має реле мінімального струму тролейбуса ЗіУ-9?*
7. *Як регулюється гальмівна сила тролейбуса ЗіУ-9?*
8. *Як регулюється прискорення тролейбуса ЗіУ-9?*
9. *Як регулюється прискорення тролейбуса 14-Тр?*
10. *Як регулюється гальмова сила тролейбуса 14-Тр?*
11. *Яке призначення випрямного моста тролейбуса 14-Тр?*
12. *Яке призначення має резистор R3 в схемі тролейбуса 14-Тр?*
13. *Які переваги має схема тягового електроприводу тролейбуса з використанням двоопераційних тиристорів?*
14. *Чим відрізняється одноопераційний тиристор від двоопераційного?*
15. *Яке призначення нульового діоду в схемі тягового електроприводу тролейбуса з використанням двоопераційних тиристорів?*
16. *Які недоліки має схема тягового електроприводу тролейбуса з використанням двоопераційних тиристорів?*
17. *Яке призначення комутуючих конденсаторів в схемі тролейбуса 14-Тр?*
18. *Чи можливо використовувати тяговий електропривод тролейбуса 14-Тр для живлення ТЕД від акумуляторної батареї?*
19. *Яким чином підвищується ККД рекуперації в схемі тягового електроприводу тролейбуса з використанням двоопераційних тиристорів?*



## 8. ЗАХИСТ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

### 8.1. Загальні відомості

Надійну роботу електричного обладнання в значній мірі визначають розрахункові режими роботи електроустаткування. Значні відхилення величин напруги і струму від допустимих меж приводять до підвищеного зносу електроустаткування або до виходу його з ладу.

Для запобігання пошкоджень і надмірно швидкому зносу електроустаткування, а також для забезпечення безпеки пасажирів, тягові двигуни, пускорегулюючу апаратуру, провода і допоміжне електроустаткування захищають спеціальними апаратами. В разі виникнення в тягових електродвигунах або на будь-якій ділянці пошкодження або аварії захисні апарати від'єднують пошкоджену ділянку або все електроустаткування від мережі.

Електричне устаткування захищають від перевантажень, коротких замикань, підвищеної і надмірно зниженої напруги, перенапружень і струмів витоку. Крім того, на електрорухомому складі встановлюють пристрої для припинення буксування коліс пристосування, що захищають радіоприйом від перешкод, які викликаються дією електроустаткування.

Під *перевантаженням* електричного кола мають на увазі величину струму, що перевищує максимально допустимий струм для елементів цього кола. Перевантаження силового кола можуть виникати із-за передчасного виключення окремих рівнів пускових або гальмівних опорів в результаті несправності або неправильної дії водія при ручному (неавтоматичному) управлінні, а також порушення правильної дії системи автоматичного управління. Перевантаження можуть виникати також при русі максимально навантаженого рухомого складу на важких підйомах. Короткі замикання виникають при порушенні ізоляції між провідниками або струмоведучими деталями електричних апаратів і машин, а також при колових вогнях на колекторах тягових двигунів і допоміжних машинах і при перекиданнях дуги на корпус електричних машин.

Перевантаження і короткі замикання призводять до перегріву обмоток тягових електродвигунів, апаратів, проводів і кабелів і при недостатній швидкодії захисту можуть викликати пошкодження окремих елементів електроустаткування і порушенню нормальної комутації електродвигунів. Перевантаження, що часто повторюються, викликають погіршення комутації електричних машин і прискорене старіння ізоляції.

Підвищення напруги в контактній мережі або на клеммах тягового електродвигуна понад допустиме значення може статися при рекуперативному гальмуванні, якщо відсутні споживачі енергії в мережі. При ТЕД змішаного збудження в цьому випадку припиняється або різко ослабляється розмагнічуюча дія послідовної обмотки збудження, а при ТЕД послідовного

збудження ослабляється дія стабілізуючого опору або зустрічної обмотки збудження збудника.

*Перенапруженням* називають короткочасне або імпульсне підвищення напруги в живлячій мережі і в електроустаткуванні при грозових розрядах, атмосферних індукованих зарядах і комутаційних процесах. На відміну від звичайного підвищення напруги перенапруження, наприклад атмосферне, характеризується короткочасною, але дуже високою величиною, що інколи перевершує у декілька разів номінальну напругу. Виникнення надмірної напруги може призвести до пробію ізоляції елементів електроустаткування, порушенню нормальної комутації і до інших несправностей, які можуть привести до важких аварій.

Зниження (нижче певної межі) напруги в контактній мережі порушує нормальну роботу електричних апаратів. Відновлення нормальної напруги після руху при зниженій напрузі без попереднього включення пускових опорів може викликати надмірне перевантаження і призвести до колового вогню на колекторах електродвигунів.

Системи захисту електрообладнання можна поділити на два класи:

- 1- превентивні;
- 2- абортивні.

Превентивні системи(попереджувальні), метою яких є попередження неполадок при відмові в роботі обладнання або системи. До цих систем захисту можна віднести реле напруги, пристосування, що захищають радіоприйом від перешкод, що викликаються дією електроустаткування.

Абортивні системи переривають розвиток небажаних процесів. До цих систем захисту можна віднести автоматичні вимикачі, запобіжники, реле максимального струму, реле перевантаження, диференційні реле, захист від буксування коліс.

## **8.2. Захист від перевантажень та коротких замикань**

Електроустаткування від перевантажень і коротких замикань захищають а допомогою автоматичних вимикачів, максимальних електромагнітних реле струму, що діють на лінійні контактори, і плавких запобіжників.

Обмотка реле максимального струму (реле перевантаження) включається в коло, що захищається. Коли струм кола перевищує струм, на який отрегульовано реле, якір останнього притягується і своїми контактами вимикає коло живлення котушок лінійних контакторів, а вони в свою чергу відключають тягові двигуни від контактної мережі. Повторне включення кола повинно здійснюватися після підготовки водієм апаратів для повторного включення. Це може бути досягнуто або відповідною схемою з'єднань реле і інших апаратів, або утримуючою котушкою або механізмом блокування реле. У останньому випадку відновлення механізму для повторного включення кола відбувається за допомогою електромагніту, вмонтованого в реле. Коло

живлення його котушки може включатися лише в нульовому положенні контролера управління при натисненні кнопки повернення реле перевантаження.

На рис.8.1 приведені деякі з можливих варіантів схем блокування реле перевантаження при роботі з лінійними контакторами, які забезпечують виконання поставленої вимоги.

У схемі (рис.8.1а) підймальна котушка лінійного контактора отримує живлення при установці контролера ходу *KX* в одне з робочих положень *1* або *2* через розмикаючі контакти реле перевантаження *РП* блок-контакти реостатного контролера *РК1*, що замкнуті лише в першому положенні. Після включення лінійного контактора його замикаючими блок-контактами *ЛК* шунтуються контакти *РК1*, внаслідок чого зберігається коло живлення *ЛК* в процесі обертання валу *РК*.

При перевантаженні спрацьовує реле перевантаження, розмикаються контактори *РП* і вимикається лінійний контактор. Після виключення *ЛК* якір реле перевантаження прийме вихідне положення і контакти *РП* знову замкнуться. Проте лінійний контактор не включиться, оскільки контакти *РК1* і *ЛК* будуть розімкнені. Повернення реостатного контролера в перше положення станеться лише при нульовому положенні контролера ходу *KX*. (Коло живлення приводу *РК* на схемі не показано). Живлення лінійного контактора відбудеться при замиканні контакту *РК1*, який замкнеться при поверненні реостатного контролера на першу реостатну позицію.

У другій схемі (рис.8.1б) реле перевантаження має утримуючу котушку УКРП. При спрацьовуванні реле перевантаження *РП* його розмикаючі блок-контакти вимикають коло живлення котушки лінійного контактора; одночасно з цим замикаючі блок-контакти включають коло утримуючої котушки УКРП, за допомогою якої якір реле стримується в тому положенні, в якому він знаходився в результаті перевантаження. Реле повертається у вихідне положення при установці контролера ходу в нульове положення, в якому утримуюча котушка вимикається.

У третій схемі (рис.8.1 в) при спрацьовуванні реле перевантаження *РП* його контакти розмикаються і такий стан підтримується за допомогою механічного блокування. Для повернення реле у вихідне положення необхідно поставити рукоятку контролера ходу *KX* в нульове положення і натискувати кнопку повернення *КВ*. Тоді електромагніт повернення реле перевантаження *ВРП* звільнить механізм блокування і контакти реле перевантаження під дією зворотної пружини повернуться у вихідне положення.

За наявності в схемах декількох паралельних гілок тягових двигунів реле перевантаження встановлюють в кожне коло. В деяких випадках, наприклад, в схемах вагонів метрополітену, ці реле мають загальну контактну систему.

Для захисту від перевантажень і струмів коротких замикань, крім реле перевантажень, що діють на виключення лінійних контакторів, застосовують автоматичні вимикачі, що встановлюються в загальному колі. Струм

відключення автоматичних вимикачів зазвичай встановлюють більшим, чим струм включення реле перевантаження, а їх час спрацьовування — значно менший сумарного часу спрацьовування реле перевантаження і виключення лінійних контакторів. Тому при коротких замиканнях зазвичай спрацьовує автоматичний вимикач, а при повільно наростаючих перевантаженнях — реле перевантаження.

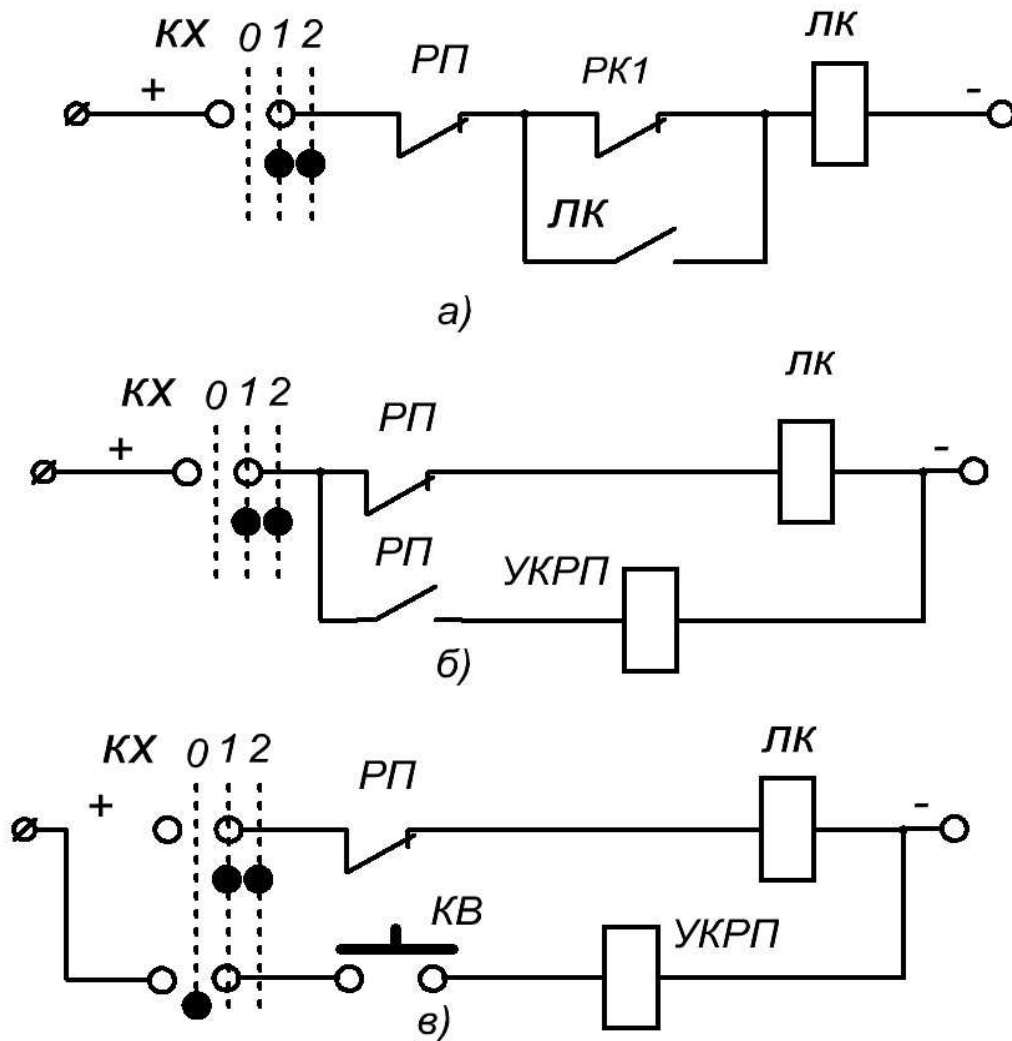


Рис. 8.1 – Схеми блокування реле перевантаження та лінійного контактора

На деяких типах вагонів метрополітену в силовому колі встановлені плавкі запобіжники, що пов'язано з необхідністю захисту ділянки кабелю від струмоприймача до лінійних контакторів з урахуванням підвищених вимоги безпеки при експлуатації вагонів метрополітену. Крім того, вони є резервним захистом на випадок неспрацьовування реле перевантаження.

Допоміжні кола і кола управління зазвичай захищають від перевантажень і коротких замикань плавкими запобіжниками. На вагонах метрополітену допоміжні кола захищені автоматичним вимикачем, а кожне коло — плавким запобіжником.

### 8.3. Захист від підвищення та зниження напруги

Захист від надмірного підвищення напруги застосовують лише на рухомому складі з рекуперативним гальмуванням. Надмірне підвищення напруги трапляється у тому випадку, коли під час рекуперативного гальмування відбувається відключення споживачів енергії в контактній мережі.

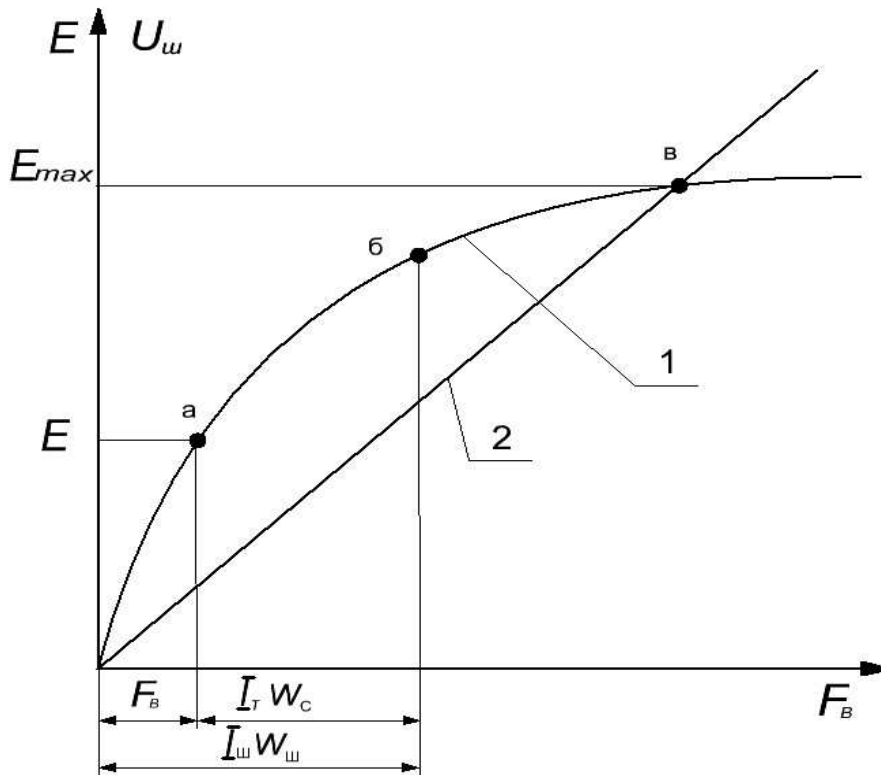


Рис.8.2 – Зміна Е.Р.С. генератора при рекуперативному гальмуванні в момент відключення споживачів енергії в контактній мережі

Процес підвищення напруги на генераторі зустрічно-змішаного збудження, наданий на рис.8.2, де крива 1 є залежністю Е.Р.С. генератора  $E$  від н. с. при постійній швидкості гальмування, а пряма 2 — падіння напруги в колі обмотки паралельного збудження від н. с. цієї обмотки. За наявності в контактній мережі споживачів енергії Е.Р.С. генератора (точка  $a$  на кривій 1) створюється під дією різниці н. с. паралельної та послідовної обмоток. Якщо струм навантаження контактної мережі зникає, то це викликає значне зростання Е.Р.С. генератора  $E$  і збільшення струму шунтової обмотки (переміщення точки  $b$  по кривій 1 вгору). Якщо при цьому не спрацює захист, то Е.Р.С. досягне значення  $E_{\max}$ , яка визначається точкою  $b$ .

При високих швидкостях гальмування  $E_{\max}$  може досягти значень, які небезпечні для діелектричної міцності ізоляції і комутаційної стійкості тягових двигунів.

Захист від надмірного підвищення напруги здійснюється за допомогою електромагнітного реле максимальної напруги або автомата напруги.

Підіймальна котушка реле максимальної напруги або автомата напруги підключається до якоря тягового двигуна через додатковий опір з малим температурним коефіцієнтом, завдяки чому зменшується вплив змін температури на опір кола і, отже, на напругу спрацьовування реле.

Зазвичай при спрацьовуванні реле максимальної напруги його контакти замикають коло підіймальної котушки контактора, що включає схему реостатного гальмування. Блок-контакти цього контактора потім вимикають коло лінійних контакторів, які відключають тягові двигуни від контактної мережі. За час спрацьовування реле і включення гальмівного контактора напруга на двигунах може досягти великої величини. Тому для прискорення процесу включення реостатного гальмування інколи реле максимальної напруги і гальмівний контактор об'єднують в загальний апарат — автомат напруги, час спрацьовування якого менше сумарного часу спрацьовування реле та контактора.

По конструкцією автомат напруги виконують як контактор з електромагнітним приводом, але з більш досконалим регулюванням магнітної системи, що дозволяє його виконати з більш стабільним струмом спрацьовування.

При розмиканні кола паралельного збудження в обмотці збудження виникає Е.Р.С. самоіндукції, яка може викликати значну перенапругу і пробій ізоляції. Для захисту від перенапруги паралельно до обмотки збудження під'єднується розрядний опір.

Значне пониження напруги не представляє небезпеки для електрообладнання, якщо не брати до уваги підвищення тривалості роботи мотор-компресора і підвищену тривалість розряду батареї. Проте подальше відновлення напруги без попереднього включення пускового опору може викликати перевантаження і коловий вогонь на колекторах двигунів, який в тяжких випадках може супроводитися перекиданнями дуги на корпус. Для захисту від подібних перевантажень на всіх видах електрорухомого складу встановлюється реле мінімальної (нульової) напруги. Це реле підключається до напруги контактної мережі через додатковий опір, так само як і реле максимальної напруги. При нормальній напрузі якір реле знаходиться в притягнутому стані, а при перерві живлення або надмірному пониженні напруги (зазвичай менше 50% від номінальної) якір реле відпадає і його контакти вимикають лінійні контактори. Крім того, подається світловий, а на тролейбусах ще і звуковий сигнали водію про надмірне зниження напруги в контактній мережі. При відновленні напруги в мережі контакти нульового реле замикаються, причому включення силового кола лінійними контакторами виконуються у всіх схемах автоматичного управління лише при повністю введених пускових опорах.

#### **8.4. *Захист радіоприйому від перешкод, які виникають при роботі електричного обладнання рухомого складу***

Основними причинами виникнення радіоперешкод є: відрив струмоприймачів від контактних проводів, різкі зміни струму при включенні і вимиканні контролера управління та контакторів силового кола, іскріння на колекторах тягових електричних двигунів, а також дія звукової сигналізації.

Поле радіоперешкод, що створюється електричним транспортом, знаходиться в діапазоні частот 0,15-400 МГц.

Захист від випромінювання радіоперешкод в основному зводиться до виключення їх проникнення в контактну мережу. Остання при цьому діє як антена передавальної радіостанції. Захист можна розділити на дві групи: загальну для всієї схеми електрорухомого складу і місцеву, яка захищає окремі кола.

В якості загального захисту використовують радіореактори, які представляють собою котушки з великим діаметром намотування без металевого осердя. Вони встановлюються на даху рухомого складу та включаються послідовно з струмоприймачами. На рухомому складі встановлюють по дві-три котушки і паралельно кожній підключають підлаштовувальні конденсатори. Для струмів високої частоти кожний з таких реакторів, включений паралельно з ємністю, являє собою великий опір. Контур має резонансну частоту  $\omega_0 = \sqrt{1/(LC)}$ , при якій має теоретично безкінечний, а практично дуже великий опір. Включаючи послідовно два-три реактора з рівними резонансними частотами, можна отримати високе значення опору для достатньо широкого спектру радіоперешкод.

Як місцевий захист паралельно контактам електричних апаратів і якорям електричних машин зазвичай встановлюють конденсатори, включені послідовно з омичними опорами. При розриві дуги на контактах електричного апарату або іскрінні на колекторі електричної машини виникаючий спектр струмів високої частоти замикається через конденсатори і гаситься в RC ланцюжку. З цією ж метою обмотки додаткових полюсів тягових двигунів розділяються на дві секції і включають симетрично відносно якоря. Ці обмотки діють як дроселі, що перешкоджають виходу в контактну мережу струмів високої частоти, які виникають при комутації й іскрінні щіток.

Практично вибір параметрів захисної схеми виконують на основі експериментального дослідження перешкод, що створюються рухомим складом за допомогою спеціальних радіотехнічних приладів.

#### **8.5. *Захист від буксування коліс транспортних засобів***

Буксування колісних пар у режимі тяги і юз при електричному гальмуванні порушують режим роботи електрорухомого складу обмежуючи силу тяги або гальмування, підвищують імовірність погіршення комутації тягових двигунів, особливо при послідовному з'єднанні двигунів, коли ковзання

викликає нерівномірний розподіл напруги між ними. Схильність колісних пар до буксування і юза істотно залежить від жорсткості тягової (гальмівної) характеристики і жорсткості характеристики ковзання.

Буксування (юз) викликає падіння сили тяги (гальмування): при послідовному з'єднанні двигунів сила тяги падає на всіх колісних парах, зв'язаних із двигунами послідовного кола.

Буксування особливо сильно впливає на роботу електрорухомого складу при веденні поїздів на підйомах із силою тяги, близькою до граничної по зчепленню, і часто обмежує вагову норму потяга. Юз лімітує гальмову силу і знижує ефективність електричного гальмування. Юз особливо небезпечний при послідовному з'єднанні двигунів і «м'яких» характеристиках ковзання, що поширюються в область негативної швидкості юза. У цьому випадку при уповільненому проходженні юзуючою колісною парою режиму повного юза ( $v_{ю} = 0$ ) можливе утворення «лисок» на бандажах, особливо при одночасній дії механічного гальма.

При великому числі моторних вагонів на електропоїздах буксування окремих колісних пар мало знижує загальну силу тяги. Крім того, тут сила тяги наближається до максимальної по зчепленню тільки в режимі пуску, і буксування звичайно лише трохи знижує прискорення потяга. Однак буксування під час автоматичного пуску, викликаючи падіння струму у колах двигунів, супроводжується спрацьовуванням реле прискорення і передчасним переходом на наступні пускові ступені. Така дія реле прискорення підсилює ковзання буксуючої колісної пари і може викликати буксування інших колісних пар вагона, оскільки двигуни в інших паралельних колах при цьому перевантажуються.

Для поступального руху поїзда необхідна наявність зовнішніх сил. Така зовнішня сила виникає в результаті зчеплення рушійних коліс з рейкою. Сила зчеплення спрямована по дотичній до поверхні колеса в точці його торкання з поверхнею рейок і є силою тяги, що викликає поступальний рух транспортного засобу. Тому цю силу називають дотичною силою тяги на ободі колеса, що рухається, і позначають  $T_e$ . Силу, що визначається обертовим моментом тягового електродвигуна, називають силою тяги і позначають  $F_o$ . При рівномірному обертальному русі колеса (кутова швидкість  $w = \text{const}$ ), якщо зневажити тертям у підшипниках, можна вважати, що ці сили рівні між собою, і вони протилежно спрямовані.

При прискореному русі ці сили не будуть рівні між собою, і співвідношення між ними буде мати наступний вигляд:

$$T_o = F_o - \frac{J}{R} \cdot \frac{dw}{dt} - W_{об}, \quad (8.1)$$



де  $J \frac{dw}{dt}$  - момент обертання від впливу інерції колеса і зв'язаних з ним

обертових частин;

$W_{об}$  – сила опору руху від тертя в підшипниках;

$\frac{dw}{dt}$  - кутове прискорення;

$R = \frac{D}{2}$  - радіус колеса;

$J$  – момент інерції обертових частин.

Сила зчеплення, що має природу сил тертя, обмежена відомими межами.

Якщо ця межа буде перевершена, тобто  $F_o - \frac{J}{R} \cdot \frac{dw}{dt} - W_{об}$  виявиться більше

максимально можливої сили зчеплення, то рівновага сил у точці торкання коліс з рейкою буде порушено. Рушійні колеса почнуть ковзати щодо шляху в точці торкання, обертаючись з більшою швидкістю, за поступальний рух транспортного засобу. Відбувається буксування коліс, при якому спостерігається підвищений знос бандажів і рейок. Крім того, при буксуванні значно знижується сила тяги, тому що сила тертя зменшується при ковзанні колеса щодо рейки. Тому при буксуванні рухомого складу на важких підйомах і поганих умовах зчеплення він зупиняється й іноді не може рушити з місця внаслідок знову виникаючого буксування. У цьому випадку порушення зчеплення може викликати затримку руху.

Отже для граничної сили зчеплення рухомого складу за формулою 8.1 має наступні обмежуючі умови:

$$F_{max} - W_{об} - \frac{J}{R} \cdot \frac{dw}{dt} \leq T_{np} \quad (8.2)$$

Згідно з формулою 8.2 максимально можлива за умовою зчеплення сила тяги:

$$F_{max} \leq T_{np} + W_{об} + \frac{J}{R} \cdot \frac{dw}{dt} \quad (8.3)$$

Тому що величини  $W_{об}$  і  $\frac{J}{R} \cdot \frac{dw}{dt}$  відносно малі в порівнянні з

величиною  $T_{np}$ , то приблизно можна вважати, що  $F_{max} \leq T_{np}$ .

Граничну силу зчеплення, що має природу сил тертя можна виразити для рейкового транспортного засобу як добуток коефіцієнта зчеплення  $\psi$  колеса з рейкою і нормальним тиском коліс.

$$T_{np} = 1000 \cdot \psi \cdot G_c \quad (8.4)$$

де  $G_c$  – зчіпна вага трамвая.

При русі на ухилах зчіпна вага трохи знижується, тому що нормальний тиск виражається співвідношенням:

$$G_c = G \cdot \cos \alpha, \quad (8.5)$$

де  $\alpha$  - кут ухилу в градусах;

Коефіцієнт зчеплення при нормальному котінні фізично відповідає коефіцієнту тертя спокою, що є частковим випадком тертя ковзання при відносній швидкості рухомих тіл, рівної нулю. Коефіцієнт зчеплення в експлуатаційних умовах не відповідає фізичному коефіцієнту тертя спокою: він менше останнього за величиною, тому що в процесі котіння колеса виникає ковзання, тобто швидкість поступального руху нижче окружної швидкості обертання коліс. Коефіцієнт зчеплення залежить:

- 1) від застосованих матеріалів коліс і рейок;
- 2) від стану поверхні колеса і рейок; наприклад, при несприятливих умовах (забруднення шляху – брудна плівка, мастильні матеріали, мокрий сніг і заledenіння) коефіцієнт зчеплення зменшується до 0,08.

Вибір розрахункового коефіцієнта зчеплення має важливе значення. Від його величини залежить вибір режиму роботи транспортного засобу: припустимих швидкостей руху, прискорення й уповільнення. Величина коефіцієнта зчеплення при даній зчіпній вазі визначає величину максимальної сили тяги і сили гальмування транспортного засобу, що можуть бути реалізовані за умовою зчеплення. Іншими словами, коефіцієнт зчеплення показує, який частині зчіпної чи гальмівної ваги транспортного засобу може дорівнювати гранична сила зчеплення.

Коефіцієнт зчеплення трамвая в цілому менше окремо взятого колеса. Це обумовлюється:

- а) нерівністю сил тяги окремих осей через неоднаковість діаметрів коліс, що рухаються, і електромеханічних характеристик двигунів;
- б) різною вагою рушійних і гальмових осей;
- в) забрудненням рейок і бандажів.

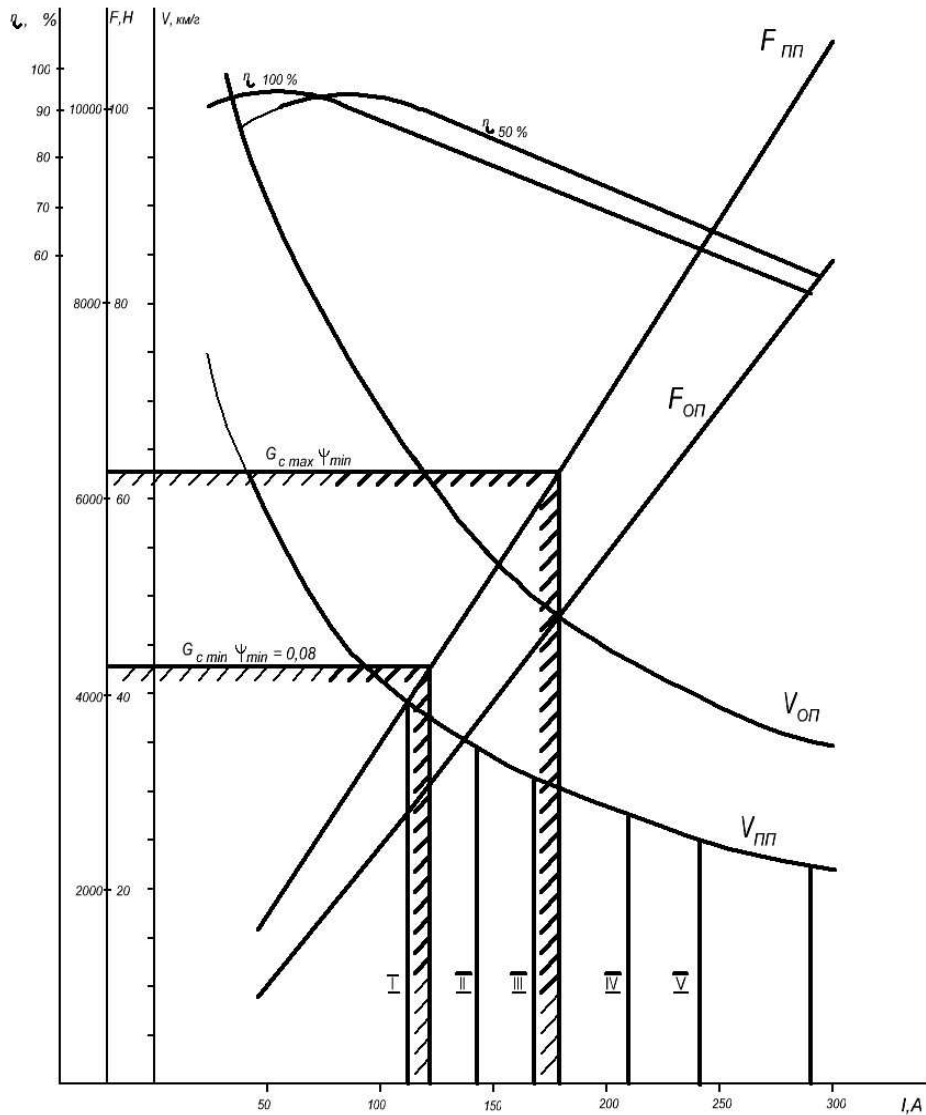


Рис. 8.3 – Електромеханічні характеристики тягового двигуна ДК - 259Г

При індивідуальному приводі, що використовується в трамвайних вагонах, коефіцієнт зчеплення визначається коефіцієнтом зчеплення найбільш розвантаженої осі, тому що при реалізації сили тяги жодна з колісних пар, що рухаються, не повинна буксувати. На підставі експериментальних даних можна припустити, що коефіцієнт зчеплення для трамвайних вагонів може знаходитися в межах від 0,08 до 0,17.

На рис. 8.3 приведені електромеханічні характеристики тягового електродвигуна типу ДК - 259Г, що використовуються на трамваї типу КТМ - 5МЗ. На цьому рисунку визначені струми уставок реле прискорення з першої по п'яту позицію контролера керування. Також сюди нанесені струми, що відповідають силі тяги для порожнього і завантаженого трамвайного вагона при мінімальному значенні коефіцієнта зчеплення (лінії виконані штрихуванням).

Як впливає з рис. 8.3, буксування колісних пар трамвайного вагона можливо навіть при максимальному завантаженні і мінімальному коефіцієнті зчеплення, тому що струм двигуна відповідний такому режиму менше струму розгону четвертої позиції. При максимальному значенні коефіцієнта зчеплення і максимальному завантаженні вагона можливий розгін трамвая без буксування колісних пар на п'ятій позиції при струмі уставки реле прискорення і силового кола 480 А.

При мінімальному завантаженні і мінімальному коефіцієнті зчеплення буксування колісних пар може наступити при розгоні, починаючи з другої позиції. При буксуванні виникають значні динамічні навантаження в колісно-моторних блоках, а також відбувається перерозподіл напруг між якорями тягових електродвигунів, що сприяє пробою якірних обмоток.

**Пристрої виявлення і припинення буксування колісних пар.** Електричні пристрої для припинення буксування рухомого складу з електричним приводом повинні складатися з двох вузлів: виявлення і припинення буксування.

Вузол виявлення оцінює інтенсивність надлишкового ковзання залежно від його величини подає сигнал на включення вузла припинення буксування.

Вузол припинення буксування робить переключення в електричній схемі, що забезпечують перехід з робочої тягової характеристики буксуючої колісної пари на захисну (зарегульовану), що викликає різке зниження сили тяги до величини меншої сили зчеплення, завдяки чому відбувається швидке припинення надлишкового ковзання колісних пар. Відключення вузла припинення буксування викликає перехід на робочі тягові характеристики.

Звичайно в функції вузла припинення буксування входить задача сигналізації про надлишкове ковзання, а також включення пристроїв сприяють підвищенню коефіцієнта зчеплення колісних пар.

Залежно від того на яку кількість колісних пар поширюється дія виконавчого пристрою по зниженню сили тяги, розрізняють виконавчі пристрої трьох типів. Це пристрої, що діють на всі колісні пари, на групу електричнозалежних колісних пар, до складу якої входить буксуюча, і селективно на одну буксуючу колісну пару.

**Пристрої виявлення буксування.** За критерієм оцінки інтенсивності буксування вузли виявлення буксування можна розділити на дві характерні групи.

У першій групі критерієм подачі сигналу є найбільше відхилення  $w_{\max}$  кутової швидкості будь-якої колісної пари від її середньоарифметичного значення для групи з декількох  $n_o$  колісних пар:

$$\Delta w_{\max} = \left| w_i - \frac{1}{n_o} \sum_{c=1}^{c=n_o} w_o \right| \max \quad (8.6)$$

Вузол виявлення буксування видає сигнал на включення виконавчого пристрою при  $\Delta w_a$  і на його вимикання при  $\Delta w_b$ . Бажано одержати як можна менше значення  $\Delta w_b$ , тому що в цьому випадку підвищується гарантія повного припинення буксування протягом часу від подачі сигналу до переходу на нормальне включення тягових електродвигунів.

За допомогою логічних елементів і блоку порівняння можна виявляти різне число буксуючих колісних пар: усі колісні пари, колісні пари окремих візків кожної групи послідовно включених тягових двигунів чи однієї буксуючої колісної пари.

Величина надлишкового ковзання колісної пари може вимірятися одним з наступних трьох способів шляхом порівняння:

- напруги на колекторах тягових двигунів, послідовно включених в одне коло;
- струмів у паралельних колах тягових двигунів;
- напруги тахогенераторів, зв'язаних з колісними парами.

У другій групі пристроїв виявлення буксування критерієм подачі сигналу на включення виконавчого пристрою є кутове прискорення однієї з колісних пар, що перевищує його значення при експлуатаційних режимах. У якості останнього може бути прийняте кутове прискорення, що відповідає дотичному прискоренню  $a=0,5 \text{ м/сек}^2$ . Сигнал на відключення подається при переході колісної пари в режим уповільнення, причому виконання його затримується з використанням реле часу.

Для більшої надійності припинення буксування доцільно створити затримку при вимиканні виконавчого пристрою і контролювати її від величини надлишкового ковзання.

Прискорення й уповільнення можуть вимірятися тими ж способами, як і у вузлах виявлення буксування першої групи, але за умови введення в ці пристрої диференціюючих вузлів.

Важливою характеристикою пристроїв виявлення буксування є чутливість.

Для першої групи пристроїв під чутливістю необхідно розуміти таку надлишкову швидкість ковзання колісної пари, при якій сигнал вузла виявлення буксування досягає значення, що викликає вимикання виконавчого органу.

Вироблення сигналу в першій групі пристроїв виявлення буксування засновано на порівнянні величин струмів чи напруг при різних швидкостях обертання. Тому для визначеності приймемо як чутливість таку швидкість, що відповідає найбільш несприятливим значенням порівнюваних величин у межах існуючих допусків і експлуатаційних швидкостей.

Для другої групи пристроїв виявлення буксування чутливість визначається окружним прискоренням колісних пар, при якому приводиться в дію виконавчий пристрій.

В другій групі допуски на характеристики двигунів і діаметри коліс не впливають на чутливість пристрою. Важливою якістю таких пристроїв

виявлення буксування є відсутність у необхідності користатися елементами порівняння. У зв'язку з цим, ці пристрої придатні для індивідуальних протибуксовочних схем, що впливають лише на коло двигуна буксуючої колісної пари. Перевагою цих пристроїв є те, що вони можуть працювати і при одночасному буксуванні всіх колісних пар транспортного засобу.

Подача виконавчого сигналу здійснюється контактним чи безконтактним способом. В обох випадках, проходячи через контрольний орган, струми включення і відключення, при яких подаються сигнали на включення і відключення виконавчого пристрою, різні.

Відношення

$$k_g = \frac{i_g}{i_o} < 1 \quad (8.7)$$

де  $i_g$  – струм включення;

$i_o$  – струм відключення, зветься коефіцієнтом повернення вузла виявлення буксування.

Звичайні значення  $k_g$  лежать у межах від 0,6 до 0,9.

При контактному способі сигнал подається через контакт реле буксування. Цей спосіб має два основних недоліки: інертність і можливість його спрацьовування від тряски. Останнє змушує мати значення  $k_g$  порядку 0,6-0,7. При безконтактному способі подачі сигналу коефіцієнт повернення може мати більш високе значення.

**Схеми виявлення буксування при послідовно з'єднаних двигунах.** На рис.8.4 надана в двох виконаннях мостова схема виявлення буксування щодо різниці напруг двох послідовно включених тягових двигунів. У першому виконанні схема має одну котушку реле буксування, що включена в діагональ мосту на різницю напруг тягових двигунів. Послідовно з котушкою реле буксування включається додатковий опір  $R_3$  для регулювання можливих технологічних відхилень колісно-моторних блоків.

При розвитку буксування колісної пари, з'єднаної з першим електродвигуном напруга  $U_1$ , стає більше  $U_2$ , у результаті чого в мостувиникає струм, спрямований від точки "б" до точки "а". При визначеному значенні струму спрацьовує реле РБ. Призначення схеми першого виконання полягає у виявленні буксування однієї з двох колісних пар, двигуни яких зв'язані загальним контрольним пристроєм.

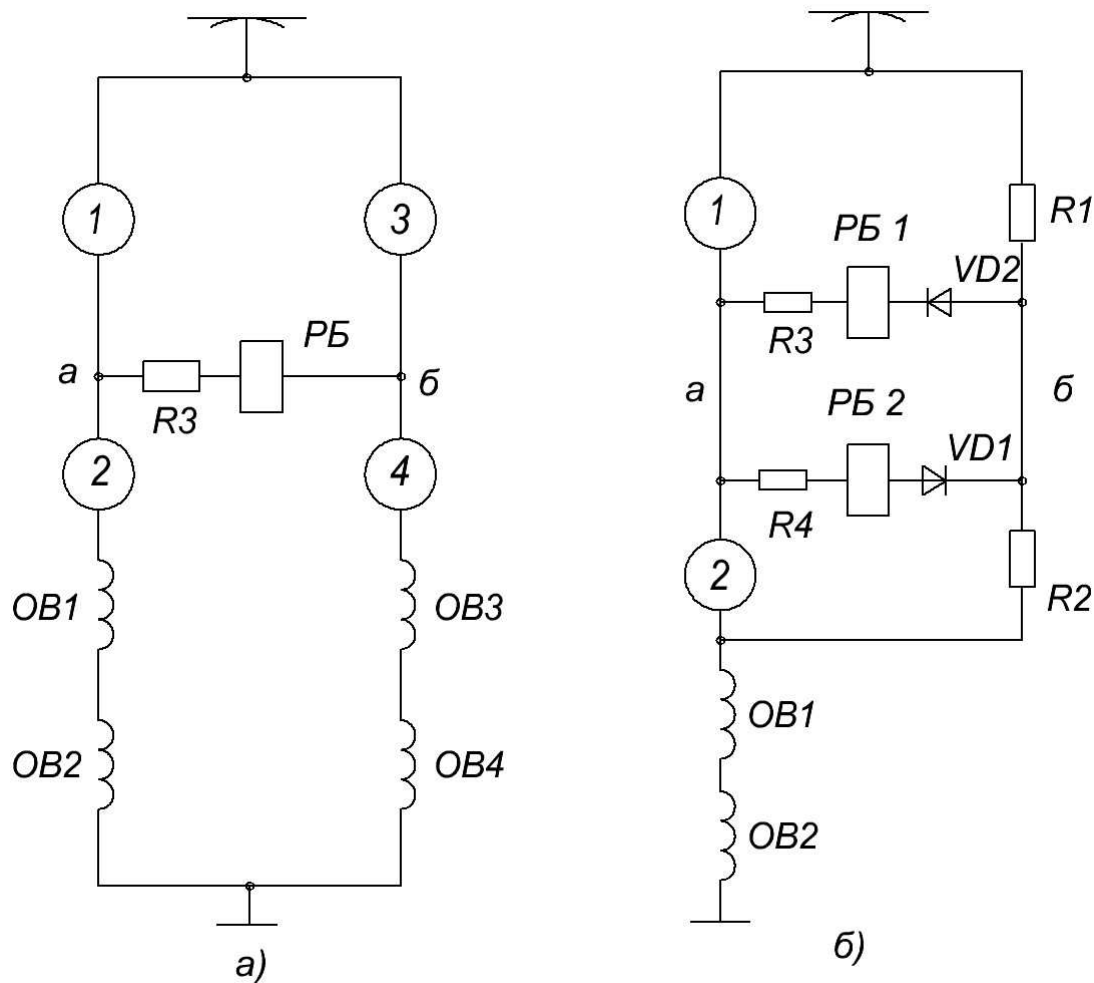


Рис.8.4 – Мостові схеми виявлення буксування

В другому виконанні міст “аб” має дві паралельні галузі, у кожному в яку через діоди включені котушки реле буксування. Тому що діоди включені зустрічно і залежно від напрямку струму спрацьовує лише одне реле буксування.

Таке виконання дозволяє застосувати селективну протибуксовочну схему, що впливає на двигун буксуючої колісної пари.

До недоліків таких схем варто віднести то, що на чутливість пристрою впливають технологічні допуски на елементи колісно-моторних блоків.

Підвищити чутливість вузла виявлення буксування можна при індивідуальному налагодженні пліч мосту, що переслідує компенсацію технологічних допусків. Практично в експлуатації таке налагодження виконати неможливо, тому приходиться загрублять чутливість, щоб не було помилкових спрацювань.

**Схеми виявлення буксування за різницею струмів.** Відхилення струмів у паралельних галузях двигунів найбільше просто контролювати непрямым чином, а за різницею напруг на обмотках збудження. На рис.8.5 наведений один

з варіантів схеми, що працює за цим принципом. При виникненні різниці потенціалів у точках *a*, *б* і *в* від більшого потенціалу до меншого через вентилі блоку порівняння і котушку реле буксування протікає зрівняльний струм. У котушці реле буксування струм протікає в одному напрямку.

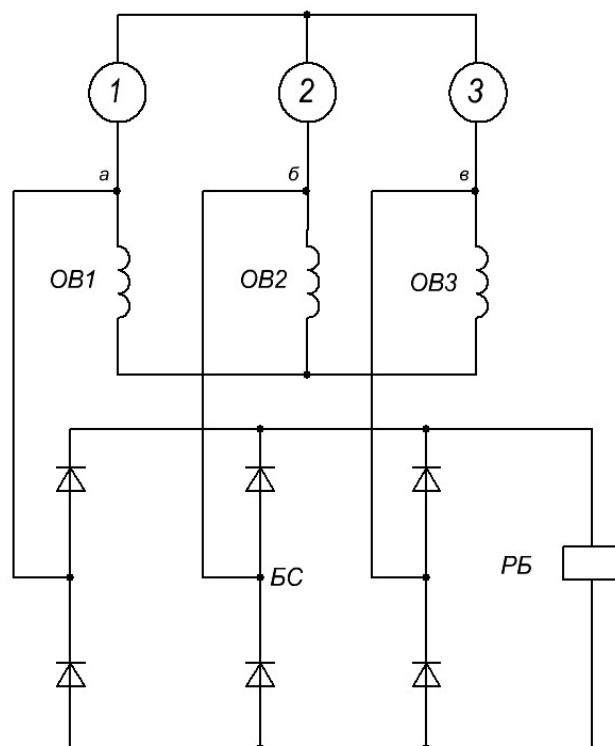


Рис. 8.5 – Схема виявлення буксування за різницею струмів ТЕД

Напруга на обмотці збудження двигуна дорівнює:

$$U = I \cdot R_{екв} \quad , \quad (8.8)$$

де  $R_{екв} = \frac{r_{\epsilon} \cdot r_{ш}}{r_{\epsilon} + r_{ш}} = \alpha \cdot r_{\epsilon}$  - еквівалентний опір обмотки двигуна;

$I, r_{\epsilon}$  – струм у ланцюзі якоря двигуна і опір його обмотки збудження;

$\alpha$  - коефіцієнт регулювання збудження.

Як впливає з виразу 8.8, напруга на вході вузла порівняння залежить від швидкості руху рухомого складу, а значить зі збільшенням її, чутливість датчика буде знижуватися.

Перевагою таких пристроїв є простота конструкції, висока надійність, здатність сигналізації про стан і несправності силового кола.

До недоліків варто віднести вплив на вихідний сигнал характеристик тягових електродвигунів, втрата сигналу при протибуксовочному впливі, залежність вихідного сигналу від перехідних процесів у силовому колі.

На рис 8.6 надана схема виявлення буксування, в якій струми тягових двигунів порівнюються з вихідними напругами трансформатора струму, що працюють на активне навантаження. Сигнал виробляється блоком порівняння



БС і подається на обмотку магнітного підсилювача, що грає роль вузла припинення буксування. Ця схема перспективна для тих систем тягового електроприводу, у яких при стаціонарних режимах автоматично регулюється розподіл навантаження в паралельних колах тягових двигунів.

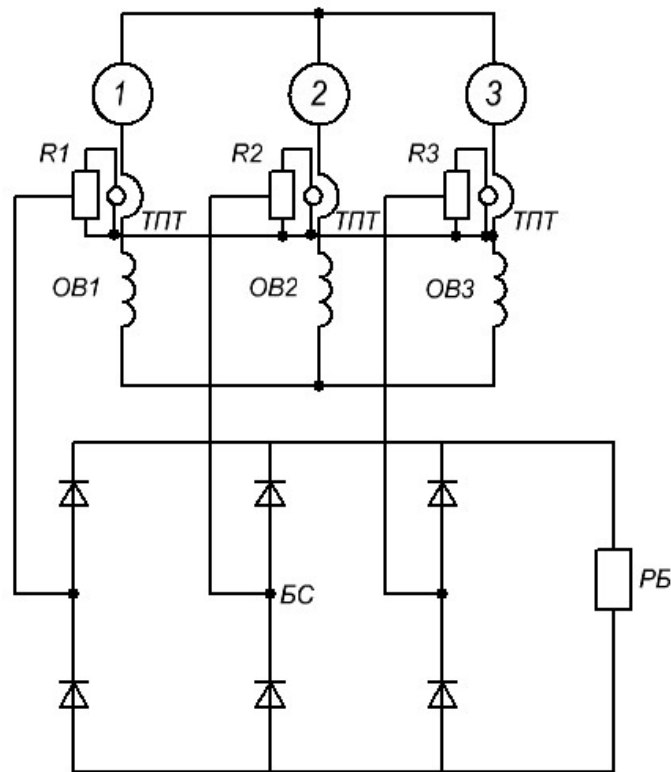


Рис. 8.6 – Схема виявлення буксування за допомогою трансформаторів струму

**Схеми виявлення буксування за різницею частот обертання колісних пар.** Структурна схема вузла виявлення буксування з різниці швидкостей обертання показана на рис 8.7а. На кожній колісній парі встановлюється тахогенератор 1, що представляє собою синхронний генератор, напруга якого змінюється пропорційно кутовій швидкості колісної пари. Очевидно, що порівнюючи напруги давачів різних колісних пар, можна знайти появу надлишкового ковзання. Для порівняння напруги давачів випрямляються і подаються на блок порівняння 3. При порушенні балансу між напругами перетворювачів 2 виникає зрівняльний струм, що через блок порівняння 3 викликає включення кола підсилювача 4, який подає живлення на котушку 5 виконавчого пристрою.

На рис 8.7 б надана принципова схема пристрою для виявлення буксування, що відповідає структурній схемі. Слід зазначити, що до складу кожного перетворювача входить трансформатор, що має прямокутну форму характеристики намагнічування і включений між тахогенератором і випрямною установкою. Це дозволяє одержати лінійну форму характеристики випрямленої напруги залежності від частоти обертання давача.

За допомогою регулювальних опорів  $R_1$  і  $R_2$  можна домогтися повного збігу характеристик. Схема подібного типу розроблена заводом “Електроважмаш” для шестиосного тепловоза і показала чутливість порядку 1 м/с у діапазоні швидкостей руху від 0 до 25 км/г.

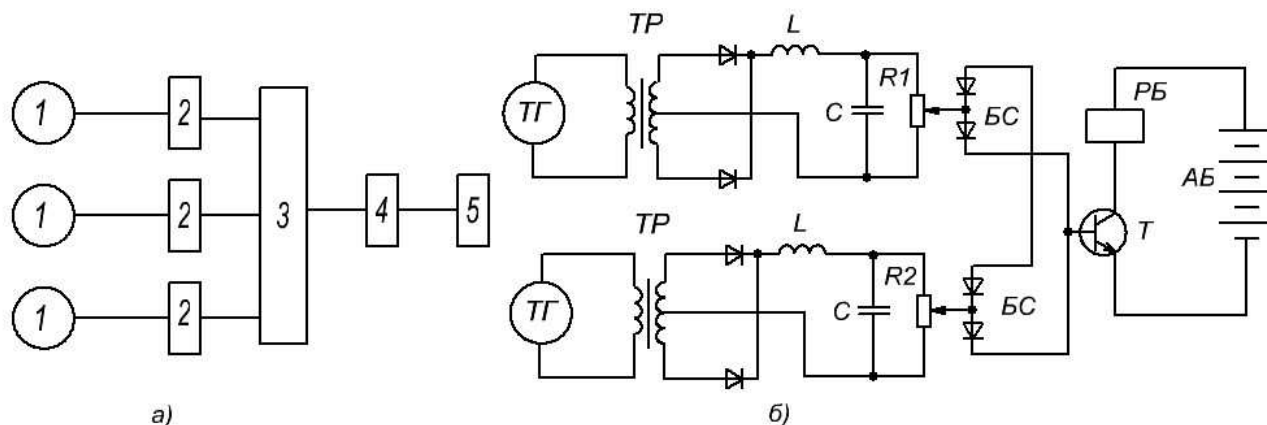


Рис. 8.7 – Структурна схема а) і принципова б) схеми виявлення буксування за різницею швидкостей колісних пар

Способи виявлення буксування, розглянуті вище засновані на принципі порівняння. Тому вони малоефективні, коли буксування поширюється на всю групу колісних пар (зокрема при стрибкоподібному підвищенні напруги). Цей недолік відсутній в схемах виявлення буксування, що працюють за прискоренням колісної пари.

**Схеми виявлення буксування по прискоренню колісної пари.** На рис. 8.8 надано структурна і принципова схеми пристроїв для виявлення буксування за прискоренням обертання колісної пари.

Блок-схеми управляються від сигналів, які виробляються тільки прискореннями колісних пар. За принципом дії вони можуть бути розділені на два типи.

Схеми першого типу (рис.8.8 а) мають датчики обертання колісних пар 1, перетворювачі 2, логічні елементи, які виділяють максимальне значення із сигналів датчиків, що мають загальний вузол виявлення буксування; диференціальний вузол 4, що створює сигнал пропорційний похідній швидкості; підсилювач імпульсів 5 і виконавчий пристрій 6.

Схема другого типу (рис. 8.8 б) відрізняється від схеми першого типу тим, що має запам'ятовуючий пристрій 7. Тому при включенні виконавчого пристрою імпульсом однієї полярності (прискорення колісної пари) забезпечується включений стан виконавчого пристрою. Після зникнення імпульсу (прискорення дорівнює нулю) до появи імпульсу протилежної полярності, який відключає виконавчий пристрій після закінчення буксування.

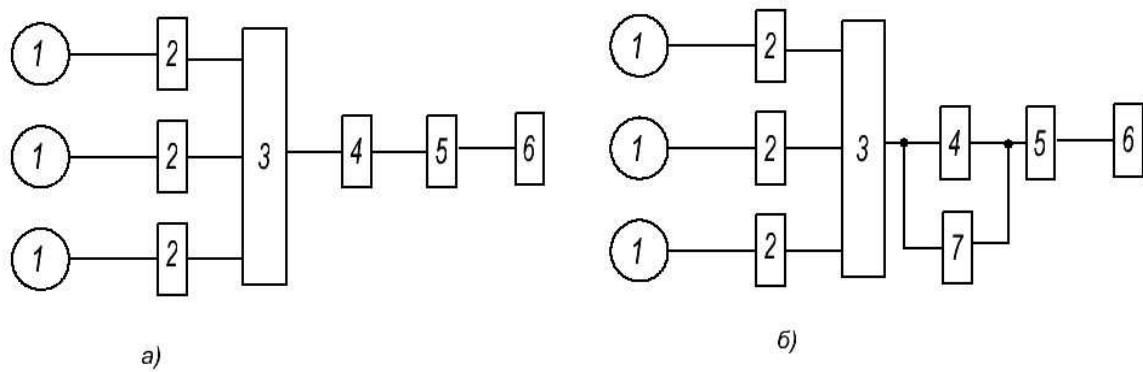


Рис. 8.8 - Схеми виявлення буксування за прискоренням колісної пари

**Вузли припинення буксування.** Розглянемо характерні вузли припинення буксування, що використовуються на рухомому складі залізничного транспорту рис. 8.9. Усі схеми можна розділити на три групи.

До першої групи відносяться пристрої, у яких протибуксовочний вплив здійснюється шляхом зниження напруги живлення тягових електродвигунів. Таке зниження може здійснюватися плавно з використанням імпульсних перетворювачів або ступенями при введенні в коло якоря буксуючого двигуна додаткового опору (рис. 8.9 а). Основним недоліком зниження напруги за допомогою додаткового опору, який включається послідовно з якорем ТЕД, є значні втрати енергії в ньому.

У другій групі схемних рішень включення виконавчого пристрою викликає збільшення магнітного потоку двигуна буксуючої колісної пари і двигунів, включених з ним послідовно. Це приводить до збільшення магнітного потоку двигуна, з'єданого з буксуючою колісною парою, а отже до зниження сили тяги і струму. Збільшення магнітного потоку може вироблятися додатковим живленням обмотки збудження від випрямляча (рис. 8.9 д) чи генератора постійного струму. В процесі зниження струму в колі якорів двигунів їхній магнітний потік росте внаслідок зростання струму додаткового живлення і через зниження дії реакції якоря.

Додаткове живлення обмотки збудження буксуючого двигуна може бути одержаним за рахунок зрівняльних з'єднань, схеми яких показано на рис.8.9 в,г. У цих випадках джерелом живлення є обмотка збудження небуксуючого тягового двигуна. Для зменшення зрівняльних струмів за рахунок розбіжності характеристик ТЕД включають додатковий опір або кілька послідовно з'єднаних діодів.

При виникненні буксування на ослабленому полі роботи тягових електродвигунів, його припинення можливе шляхом переключення двигунів на повне поле.

Для збільшення протибуксовочного впливу необхідно робити додаткове живлення обмоток збудження з одночасним переходом на повне поле.

Недоцільно застосовувати додаткове живлення при малих швидкостях, коли великі значення пускового опору введені в коло якоря і магнітна система тягових електродвигунів насичена.

У третій групі протибуксовочних впливів виконавчий пристрій виконується у виді активного опору, що підключається паралельно якірній обмотці буксуючого двигуна (рис.8.9б). Включення шунтуючого резистора викликає швидке зниження струму якоря, а за певних умов – навіть зміну його напрямку, що вказує на перехід двигуна в генераторний режим. Це призводить до швидкого припинення буксування.

***Протибуксовочний пристрій, який впливає на зчіпну масу рухомого складу.*** Для усунення буксування і юза колісних пар необхідно зменшити силу тяги чи гальмування, або збільшити зчеплення колеса трамвайного вагона з рейкою. Однак, досвід експлуатації показує, що навіть при плавній зміні напруги на тяговому електродвигуні при несприятливих умовах роботи (мале завантаження рухомого складу, мінімальний коефіцієнт зчеплення, крутий підйом і ін.) не вдається забезпечити розгін трамвайного вагона через виникнення буксування і юза.

На кафедрі міського електротранспорту Іркутського політехнічного інституту розроблено пристрій, що істотно знижує буксування і юз трамвайного вагона за рахунок підвищення сили зчеплення збільшенням у момент буксування і юза зчіпної ваги трамвайного вагона рис. 8.10. Пристрій цей являє собою електромагніт постійного струму з оптимальними тяговими характеристиками, що жорстко фіксується на подовжній балці візка, на визначеній висоті над рейкою.

На підставі досліджень, а також математичним моделюванням умов роботи для зниження буксування і юзу прийняті умови для розрахунку необхідної сили, що розвивається розробленим пристроєм: при нормальному навантаженні рухомого складу  $G_{\text{сн}} = 253000 \text{ Н}$  коефіцієнт зчеплення дорівнює 0,1 (тобто мінімальний), звідси сила зчеплення - 25 300 Н, максимальна сила тяги трамвайного вагону дорівнює 32 000 Н.

Одним з важливих параметрів для розрахунку електромагніта пристрою є повітряний зазор між магнітопроводом і рейкою, тому що величина його, з одного боку, повинна гарантувати умови нормального проходження пристрою над стиками і стрілками при русі трамвайного вагона, а з другого, відповідати мінімальним техніко-економічним показникам (величина сили притягіння, струм в обмотці електромагніта, перетин і число витків обмотки, витрати і вартість електроенергії). Цим умовам відповідає повітряний зазор завбільшки 10 мм.

Ліквідація буксування і юзу трамвайного вагона забезпечується умовою  $F_{\text{т}} \leq F_{\text{сц}}$ , де  $F_{\text{т}}$  — сила тяги,  $F_{\text{сц}}$  — сила зчеплення. Виходячи з цього, визначаємо, що для зниження буксування і юза необхідно створити додаткову силу зчеплення  $F_{\text{дод}} = F_{\text{т}} - F_{\text{сц}}$ , яка повинна бути не меншою ніж 6700 Н. З огляду на те, що на кожному трамвайному вагоні передбачається

встановлювати чотири пристрої, величина стискального зусилля, створюваного одним електромагнітом пристрою, була визначена в 1700 Н. При цьому за номінальну величину сили струму, що протікає по обмотці електромагніту, був прийнятий номінальний розрядний струм акумуляторної батареї трамвайного вагона, що обумовлено застосуванням пристроїв на трамвайних вагонах, що знаходяться в експлуатації, без заміни на них джерел живлення.

Відповідно до обраних параметрів і обмеженням був розрахований електромагніт пристрою, на підставі чого визначені його конструктивні й електричні параметри. Крім того, був виконаний розрахунок і конструювання механічного кріплення пристрою на візку трамвайного вагона з обліком виникаючих стискальних зусиль, створюваних електромагнітом.

Пристрій для створення додаткового стискального зусилля встановлено між колесами візка трамвайного вагона над рейкою поруч з рейковим електромагнітним гальмом, що найбільше зручно для виготовлення і експлуатації. Однак послідовно встановити між колесами трамвайного вагона таке гальмо неможливо через його габарити. З одного боку, розміри розробленого пристрою обумовлені необхідністю забезпечення розрахункових величин додаткового зусилля, а з другого - розміри рейкового гальма гарантують створення необхідного гальмового зусилля.

З метою рішення виниклого завдання було запропоновано модернізувати конструкцію рейкового електромагнітного гальма за рахунок зменшення довжини його башмака. При цьому піддалися реконструкції й електромагнітна частина. Однак головним є те, що при всіх цих змінах були збережені основні тягові характеристики рейкового гальма, що відповідають його паспортним даним, крім того, збережено його існуюче джерело живлення. Модернізоване рейкове гальмо випробували на стенді, в результаті чого виявлено, що тягові, механічні, теплові й інші характеристики його збережені відповідно до паспортних вимог.

Ведуться роботи з дослідження розробленого пристрою для зниження буксування і юза трамвайного вагона і модернізованого електромагнітного рейкового гальма в умовах трамвайного парку.

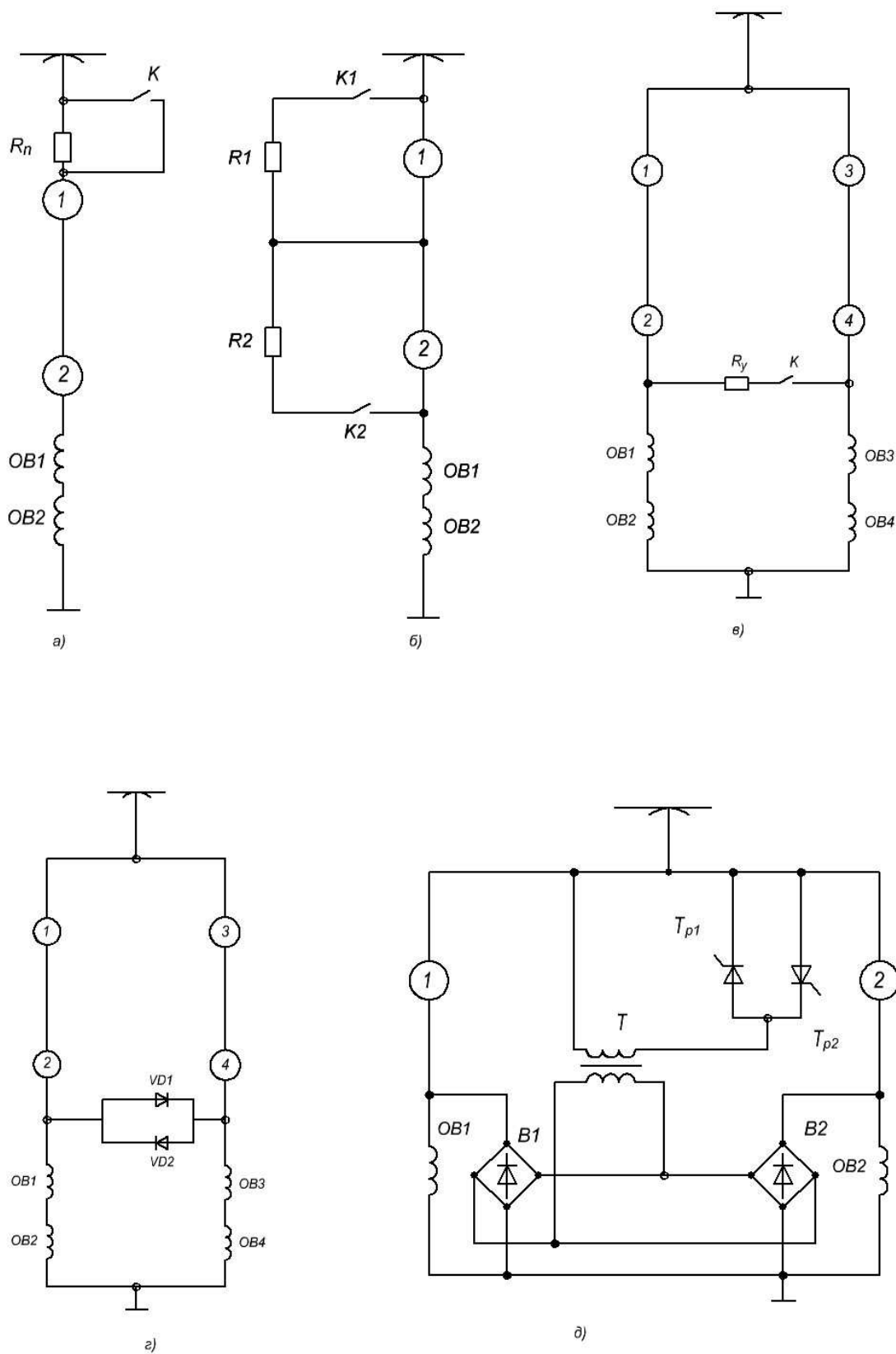
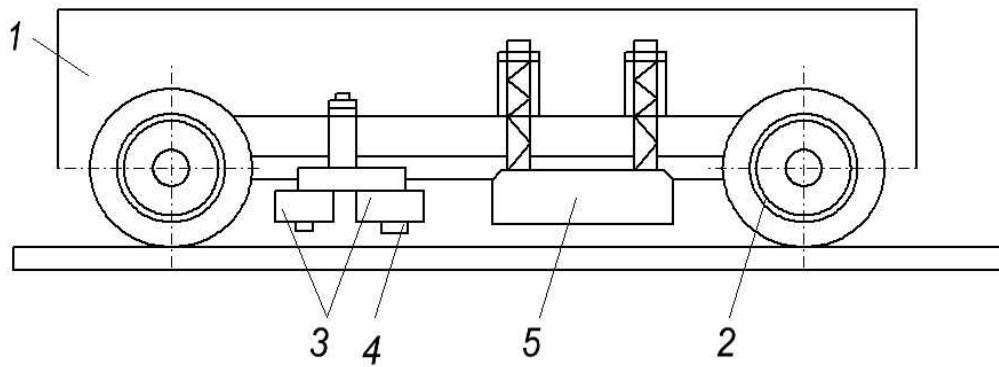


Рис.8.9 – Схеми припинення буксування колісних пар

Перспективним напрямком застосування такого типу протибуксовочного пристрою можна вважати використання магніторейкових гальм в якості

пристрою для підвищення зчепної ваги трамвайного вагону. Для цього необхідно передбачити пристрій, який дозволить би використовувати магніторейкові гальма з зазором в кілька міліметрів між башмаком і рейками. Це також потребує додаткового переобладнання магніторейкових гальм пневматичними або гідравлічними приладами для фіксації башмака на заданій відстані від головки рейки при наявності струму в котушці електромагніту.



1 - візок трамвая; 2 - колесні пари; 3 - котушки електромагнітів; 4 - осердя магніту;  
5 - магніторейкові гальма.

Рис. 8.10 - Протибуксовочний пристрій, який впливає на зчіпну масу рухомого складу

#### Контрольні запитання:

1. Що таке перевантаження електричного кола ?
2. Як захищають від перевантажень і коротких замикань допоміжні кола і кола управління?
3. З якою метою на рухомому складі застосовують реле максимального струму?
4. В якому режимі роботи може виникнути надмірне підвищення напруги на якорі ТЕД?
5. Як виконується захист електрообладнання від надмірного підвищення напруги на якорі ТЕД?
6. Як захищають від перевантажень і коротких замикань ТЕД?
7. Як виконується захист електрообладнання від неповних коротких замикань?
8. З якою метою на рухомому складі застосовують автоматичні вимикачі?
9. Як виконується захист радіоприйому від перешкод, які виникають при роботі електричного обладнання рухомого складу?
10. З якою метою виконують захист від буксування коліс транспортних засобів?
11. Як виконується класифікація систем захисту?
12. З яких вузлів складається протибуксовочний пристрій?
13. Які типи вузлів виявлення буксування коліс вам відомі?
14. Які типи протибуксовочних впливів використовують на рухомому складі?
15. Як працює протибуксовочний пристрій, який впливає на зчіпну масу рухомого складу?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ГОСТ 2582-81 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические требования., 50с.
2. Максимов А.Н. Городской электротранспорт: троллейбус. М.: Академия, 2004.-256 с.
3. Троллейбусы: Устройство и техническое обслуживание./Под. Ред. Н. В. Богдана.- Минск: ТАМРАСАТ, 1997.-254 с.
4. cheprasov.boom.ru/elektrikaziu9
5. trolley.ruz.net
6. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1983.-328 с.
7. Байрыева Л.С., Шевченко В.В. Электрическая тяга. Городской наземный транспорт. - М.: Транспорт, 1986.-206 с.
8. Кутыловский М.П. Электрическая тяга. Городской электрический транспорт. - М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1970.-263 с.
9. Осипов С.И., Миронов К.А., Ревич В.И. Основы локомотивной тяги. -М.: Транспорт, 1975.-440 с.
- 10.Ефремов И.С., Косарев Г.В. Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование). ч.1 и ч.2.-М.: Высшая школа, 1981.- 294 с. и 248 с.
- 11.Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями.- М.: Транспорт, 1986.-230 с.
- 12.Корягина Е.Е., Коськин О.А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов.- М.: Транспорт, 1982.-296 с.
- 13.Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. - М.: Транспорт, 1987.-536 с.
- 14.Находкин М.Д., Василенко Г.В., Козорезов М.А., Лупкин Д.М. Проектирование тяговых электрических машин. - М.: Транспорт, 1967. – 536 с.
- 15.Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог.- М.: Транспорт, 1980.-471 с.
- 16.Иоффе А.Б. Тяговые электрические машины.- М.-Л.: Энергия, 1965.-232 с.



Навчальне видання

АНДРІЙЧЕНКО Володимир Павлович,

ЗАКУРДАЙ Світлана Олександрівна

## **«Електричне обладнання транспортних засобів»**

Конспект лекцій

для студентів 3-4 курсів усіх форм навчання напряму підготовки  
6.050702 «Електромеханіка» та слухачів другої вищої освіти спеціальності  
«Електричні системи і комплекси транспортних засобів»

Редактор *З. І. Зайцева*

Комп'ютерне верстання *С. О. Закурдай*

План 2009, поз. 75 Л

---

Підп. до друку 31.08.2010 р.	Друк на ризографі.
Формат 60x84 1/16	Ум. друк. арк. 8,1
Тираж 70 пр.	Зам. №

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електрона адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 731  
від 19.12.2001